

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Aplicación del método Six-Sigma para reducir la  
variabilidad en un proceso de fabricación**

**MEMÒRIA**

**Autor:** Marta Muñoz Castro  
**Director:** Josep A. Sánchez Espigares  
**Convocatòria:** Julio 2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## RESUMEN

El objetivo del proyecto es resolver la problemática derivada de la alta variabilidad de producción de un proceso industrial del sector de la producción de cables. Para llevar a cabo el proyecto se sigue la filosofía de mejora continua por excelencia: *Six-Sigma*.

A modo introductorio se presenta la empresa, el proceso de producción completo del cable en el que se enmarca el subproceso que se estudia en el proyecto: el envasado. Este subproceso se detalla en más profundidad para una mejor comprensión. De igual manera, se introduce la metodología que se usará.

A continuación se pasa a aplicar los conceptos de *Six-Sigma* al proyecto concreto que se estudia. De aquí en adelante son los pasos marcados por la estructura DMAIC; Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar los que permiten llegar a la resolución del problema.

El método en el que se ha basado el estudio ha sido una recolección de datos de un periodo de dos meses de la producción de las tres máquinas encargadas de empaquetar el cable. Estos datos han constituido los pilares en los que se apoya este proyecto. Inicialmente se definieron los objetivos y característica crítica de calidad, definición de recursos y mapa del proceso. Se hizo una primera exploración de los datos en el capítulo de medida y se profundizó con más herramientas estadísticas en el apartado de análisis cuáles eran los factores y covariables que afectaban significativamente en la variabilidad de producción.

Debido a la complejidad que tiene el estudio de una variabilidad, las dos últimas fases del proyecto no se han podido llevar a cabo de manera práctica y se presentan en este documento de forma teórica.

Tras el estudio destacar, que se han podido encontrar factores que afectan a la variabilidad y se han propuesto mejoras para mejorarla. Por otro lado, aspectos que no se han podido analizar debido a la falta de datos se han propuesto como posibles proyectos de mejora para llevar a cabo un futuro.





# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>5</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>9</b>
2.1. Motivación .....	9
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
3.1. Objetivos.....	11
3.2. Alcance.....	11
<b>4. ENTORNO DE TRABAJO</b>	<b>13</b>
4.1. La empresa .....	13
4.2. Proceso de fabricación del cable.....	13
4.2.1. Recepción de materias primas.....	14
4.2.2. Trefilado primario y multifilar .....	14
4.2.3. Cableadoras y turonadoras.....	14
4.2.4. Granceadoras .....	15
4.2.5. Extrusión .....	15
4.2.6. Empaquetado.....	15
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>17</b>
5.1. Introducción .....	17
5.2. Historia .....	17
5.3. Métrica <i>Six-Sigma</i> .....	18
5.4. Principios de <i>Six-Sigma</i> .....	19
5.5. Actores y roles del <i>Six-Sigma</i> .....	20
5.6. Proceso .....	21
5.7. Fase Previa .....	22
5.7.1. D (Definir).....	23
5.7.2. M (Medir).....	23
5.7.3. A (Analizar) .....	24
5.7.4. I (Mejorar) .....	25
5.7.5. C (Controlar) .....	25
5.8. Resultados .....	26
<b>6. ESTUDIO DEL PROYECTO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA</b>	

<b>SIX-SIGMA</b>	<b>27</b>
6.1. DEFINIR.....	27
6.1.1. Planteamiento del problema .....	27
6.1.2. Definición de recursos.....	28
6.1.3. Mapa del proceso .....	29
6.1.4. Característica crítica de calidad y objetivos .....	30
6.2. MEDIR .....	31
6.2.1. Definición de las covariables estudiados .....	32
6.2.2. Estudio temporal de las características críticas de calidad .....	32
6.2.3. Búsqueda de posibles covariables que afectan a la característica crítica de calidad .....	39
6.3. ANALIZAR .....	46
6.3.1. Diagrama de Causa-Efecto.....	46
6.3.2. Modelos de regresión .....	47
6.3.3. Anova.....	53
6.3.4. Análisis confirmatorio .....	61
6.3.5. Plantillas de recogida de datos .....	62
6.4. MEJORAR .....	65
6.4.1. Niveles de los factores significativos .....	65
6.4.2. Lluvia de ideas .....	65
6.5. CONTROLAR .....	67
<b>7. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y COSTES</b>	<b>69</b>
7.1. Planificación temporal .....	69
7.1.1. Planificación teórica .....	69
7.1.2. Planificación real .....	70
7.2. ESTUDIO ECONÓMICO .....	71
<b>8. IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>75</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>79</b>

# 1. GLOSARIO

CCC: Característica crítica de calidad

VIF: Variance Inflation Factors (Factor de inflación de la varianza)

DOE: Design of Experiments (Diseño de experimentos)

SIPOC: Supplier, Input, Process, Output, Customer (Proveedor, Entrada, Proceso, Salida, Cliente)

DPM: Defectos por millón

DMAIC: Define, Measure, Analyze, Improve, Control (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar)

TR3, TR4, TR5: Trascanadoras número 3, 4 y 5



## 2. PREFACIO

La competencia entre empresas cada vez es mayor, éstas tratan de producir mayores cantidades con menores costes, lo que implica que busquen nuevos métodos de mejora continua para poder aplicar a sus procesos y productos con tal de optimizar recursos, ahorrar energía y ganar en competitividad.

En este marco se justifica la realización del proyecto cuyo objetivo es mejorar un proceso de fabricación dentro de un entorno industrial aplicando la metodología *Six-Sigma*. A pesar de que existen muchos sistemas de mejora, se ha escogido éste ya que, anteriormente, se ha aplicado a otros proyectos dentro de la empresa y su éxito ha sido probado.

Este proyecto se ha realizado en una empresa del sector industrial que se dedica a la fabricación, distribución e instalación de cables que por motivos de confidencialidad no se revelará su nombre. Se trata de una multinacional con sedes en América, Europa, Asia Pacífico y África. Cuentan con unos 11.000 trabajadores y una gama de más de 100.000 productos.

El proyecto se centra en la parte final del proceso productivo: el empaquetamiento del cable. Esta sección cuenta con tres máquinas que se encargan de esta función pero con características y potencias diferentes.

### 2.1. Motivación

La empresa en la que se ha llevado a cabo el proyecto está volcada en la filosofía de mejora continua. Gran parte de los trabajadores se han formado en términos de calidad y participan activamente en las vías que propone la empresa con tal de mejorar el día a día de sus puestos de trabajo y entorno, para poder contribuir en una mejora de la calidad global.

De esta manera se desarrollan continuamente proyectos en el que se usan metodologías varias, y en los que operarios y dirigentes trabajan juntos para conseguir un objetivo común: la excelencia. Esto hace que en general haya una alta participación, buena predisposición a los cambios y a la experimentación.

El proyecto se ha realizado básicamente por un tema de planificación de la producción. Los pedidos llegan a la empresa y no se sabe con exactitud en qué fecha podrán ser entregados al cliente, lo que comporta gastos por aplazamiento de la entrega o por almacenaje del stock que se produce antes de tiempo.



## 3. INTRODUCCIÓN

El proyecto consiste en mejorar un proceso de producción en un entorno industrial mediante la metodología de mejora continua *Six-Sigma*.

### 3.1. Objetivos

El objetivo principal del proyecto consiste en la mejora de un proceso de fabricación mediante la reducción de la variabilidad de la producción.

Las máquinas que se estudiarán se llaman trscanadoras y son las encargadas de empaquetar el producto final. Los metros de cable que se sirven dependen del pedido del cliente por lo que estos son muy variables. Lo que se pretende con este proyecto es conseguir que el número de pedidos que se llevan a cabo cada día en cada turno sea lo más constante posible.

Por otro lado, como objetivo secundario se quiere maximizar la producción. Al no ser las tres máquinas iguales se estudiarán por separado buscando una mejora particular para cada una de ellas.

### 3.2. Alcance

A partir del objetivo definido, el proyecto comienza haciendo una descripción del proceso de producción del cable para poder enmarcar la función de las máquinas trscanadoras y poder comprenderlas mejor. El proyecto se centrará solamente en estas tres máquinas y excluye procesos anteriores o posteriores que pudieran llegar a afectar a la producción de estas. El resultado del proyecto se basa en hipótesis propuestas para ser testadas en el momento de llevar a cabo el proyecto completo.





## 4. ENTORNO DE TRABAJO

La idea de este proyecto nace de las prácticas curriculares que he realizado este último año del grado en la empresa. Durante mi estancia se me brindó la posibilidad de hacer de realizar el Trabajo de Fin de Grado con ellos y pensé que era una buena oportunidad porque esto me permitía aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera en un caso real del mundo laboral.

### 4.1. La empresa

La empresa en la que se enmarca el proyecto es una multinacional que se dedica al diseño, fabricación y aprovisionamiento de soluciones de sistemas y cables de aluminio, cobre y fibra óptica. Los principales campos en los que trabaja son la transmisión y distribución de energía, la construcción, el uso industrial y las comunicaciones. La gran mayoría de estos cables se caracterizan por tener un núcleo metálico y un envoltorio plástico o de algún otro compuesto.

La planta en la que se ha llevado a cabo el proyecto está especializada en la parte metalúrgica de dichos cables aunque también tiene una pequeña parte de extrusión de plástico. Ocupando una superficie de 195.000 metros cuadrados se dedica a la fabricación de cables de baja tensión para todo tipo de instalaciones, tanto hilos y conductores de cobre y aluminio como también cables de control.

El departamento de Planning y Materias Primas se encarga de la organización, control y calidad de la producción, distribución de los turnos de trabajo en la fábrica y las necesidades de materias primas entre otros asuntos.

### 4.2. Proceso de fabricación del cable

Como se ha comentado en el apartado anterior, hay cables que se fabrican íntegramente en la planta. En la Figura 4.1 se expone un esquema de cuáles son los procesos por los que pasan los materiales desde que llegan a la fábrica hasta que se obtiene el producto acabado. En esta figura se resalta el subproceso que es objeto de estudio en el plan de mejora.

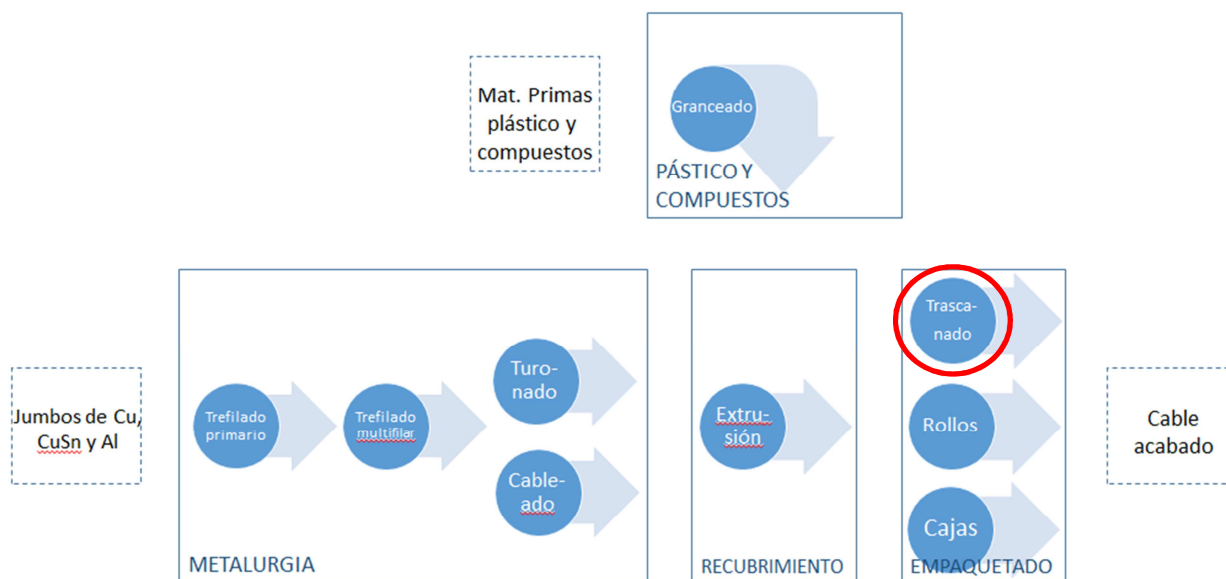


Figura 4.1. Proceso de fabricación del cable. Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1. Recepción de materias primas

Las materias primas que llegan a la fábrica se distinguen en dos grandes grupos. Por un lado se tiene la parte metalúrgica dónde llegan jumbos de cobre, de cobre estañado y de aluminio. Por el otro la parte del recubrimiento del cable que es más variada, que incluye todo tipo de plásticos (sobretudo polietileno y PVC) y otro tipo de compuestos como resinas, aceites...

#### 4.2.2. Trefilado primario y multifilar

Los jumbos de los diferentes materiales se someten a un primer proceso de trefilado que consiste en hacer pasar el alambre a través de hileras para disminuir su sección. Esto se consigue gracias a que el cobre y el aluminio son materiales dúctiles. En una sola pasada por estas máquinas no se consigue disminuir la sección inicial a la deseada. Así pues se utiliza el trefilado primario que a partir de un solo jumbo de metal (un solo alambre) se consigue disminuir notablemente la sección y, posteriormente, con el trefilado multifilar se someten al mismo proceso varios hilos a la vez (normalmente 8, 12, 16, 28 y 42) pero reduciendo la sección en una proporción mucho menor. En algunos casos (hilos de sección muy pequeña o hilos de aluminio), se realiza un trefilado medio. Una vez se han trefilado los hilos, se almacenan en bobinas.

#### 4.2.3. Cableadoras y turonadoras

El objetivo de estos dos procesos es el mismo: trenzar el hilo de metal para conseguir la parte conductora de los cables. La diferencia es el orden de magnitud. En el proceso de

turonado se obtienen cuerdas cuya sección va de  $0,5 \text{ mm}^2$  a  $6 \text{ mm}^2$ . En cambio, en el cableado són de  $6 \text{ mm}^2$  hasta  $630 \text{ mm}^2$ . El procedimiento de ambos procesos es torsionar los hilos que se han obtenido en el anterior proceso de trefilado..

#### **4.2.4. Granceadoras**

Esta parte ya no se incluye en la metalurgia sino en la de plásticos y otros compuestos. La función de las granceadoras es formar el compuesto que se usará posteriormente en el recubrimiento aislante de los cables. Los compuestos que se obtienen suelen llevar una numeración dependiendo del porcentaje de cada materia prima que se utiliza.

#### **4.2.5. Extrusión**

A partir de los hilos trenzados y de los compuestos de las granceadoras se fabrica el cable tal y como lo conocemos con el metal conductor en el centro y el envoltorio aislante. Para ello los compuestos pasan a unas máquinas llamadas extrusoras que funden lo funden, y a través de un husillo que lo empuja, consigue que salga por una boquilla alrededor del núcleo de cuerda de metal. A medida que se va extruyendo el compuesto polimérico, el núcleo de metal avanza a la misma velocidad de manera que queda completamente recubierto. Mediante unos chorros de agua se consigue que el aislante solidifique y finalmente se almacena el cable en unas bobinas de gran capacidad.

#### **4.2.6. Empaquetado**

La última fase antes de la entrega al cliente es la de empaquetado. En la planta, al estar especializados en baja tensión, hay cables que se venden a otras empresas y otros que van directos a tiendas para su venta directa al consumidor. Es por eso que hay existen diferentes tipos de envasado en la fábrica. El más utilizado por ellos es trascanado de bobinas. Éste es el método en torno al cual se centrará este Trabajo de Fin de Grado. Sirve únicamente para la venta de cable a otras empresas. Consiste en trasladar el cable de las bobinas grandes en las que está almacenado a unas más pequeñas para que tengan la cantidad justa que ha pedido el cliente. Para llevar a cabo este proceso en la empresa hay 6 máquinas que cada una está especializada según el diámetro del cable a empaquetar. De estas 6 máquinas actualmente sólo están operativas 3 de ellas y son las que se van a estudiar en este proyecto.

Los otros dos métodos de empaquetado son el de rollos de cable que se envasan con papel film (muy pequeñas cantidades) y en cajas de cartón cuya producción también es reducida.



## 5. METODOLOGÍA

En este capítulo se expondrá lo que es la metodología *Six-Sigma*, cuáles son sus objetivos, fases y herramientas involucradas en su desarrollo. En la primera parte se hace una pequeña introducción al método y sus antecedentes así como la métrica que utiliza. Posteriormente, se exponen los principios y la estructura humana que permite llevar a cabo la metodología. Por último se describe el proceso y sus fases detalladamente.

### 5.1. Introducción

*Six-Sigma* es una metodología de mejora continua de procesos que se centra en la reducción de la variabilidad para reducir o eliminar los defectos o fallos que se producen en la entrega o servicio a un cliente. Se basa en métodos estadísticos rigurosos que emplean herramientas de calidad y análisis matemáticos. La meta es lograr que los procesos tengan una calidad *Six-Sigma*, es decir, pretende llegar a un máximo de 3,4 DPM (defectos por millón), entendiéndose por defecto cualquier evento en un producto o servicio que no logra satisfacer al cliente. La representación estadística en *Six-Sigma* describe cuantitativamente cómo se está comportando un proceso.

El objetivo se pretende alcanzar mediante un programa vigoroso de mejor, diseñado e impulsado por la alta dirección de una organización en el que se desarrollan los proyectos. Sigma es la desviación típica que da una idea de la variabilidad de un proceso y la meta de *Six-Sigma* es la reducción de esta para que el proceso se encuentre siempre dentro de los límites establecidos por los requisitos del cliente.

6 sigma implica una eficiencia del 99,99966%. Se puede clasificar la eficiencia de un proceso con base en su nivel de sigma. Dentro de los beneficios que se obtienen al utilizar este método se encuentran la mejora de la rentabilidad y la productividad dado que está orientado al cliente.

### 5.2. Historia

*Six-Sigma* se basa en el desarrollo de las teorías sobre calidad de más éxito de después de la segunda guerra mundial. Las precursoras más directas son:

TQM: *Total Quality Management* o Sistema de Calidad Total: se desarrolló en las décadas de 1950 y 1960 por industrias japonesas. Pretendía crear conciencia de calidad de todos los procesos de organización.

SPC: *Statistical Process Control* o Control Estadístico de Procesos: se desarrolló en los años 1920 y se empezó a aplicar después de la segunda guerra mundial en Estados Unidos. Los gráficos de control permiten usar criterios objetivos para distinguir variaciones de fondo.

Círculo de Deming o PDCA: se basa en es una espiral de mejora continua cuyos pasos son planificar-hacer-verificar-actuar. Es muy utilizado por los sistemas de gestión de la calidad (SGC) y los sistemas de gestión de la seguridad de la información (SGSI).

La metodología *Six-Sigma* fue iniciada en Motorola en el año 1988 por el ingeniero Bill Smith, como una estrategia de negocios y mejora de la calidad, pero posteriormente se mejoró y popularizó por General Electric.

Actualmente, la filosofía de *Six-Sigma* ha ido evolucionando desde su aplicación como herramienta de calidad e incluirse en valores clave de algunas empresas. Aunque comenzó en empresas del sector industrial se ha ido extendiendo con éxito en el sector servicios.

*Six-Sigma* se ha visto influenciada por el éxito de otras herramientas, como *lean manufacturing*, con las que comparte algunos objetivos y que pueden ser complementarias, lo que ha generado una nueva metodología conocida como *Lean Six Sigma (LSS)*.

### 5.3. Métrica *Six-Sigma*

La letra griega sigma  $\sigma$  se utiliza en estadística para denominar la desviación estándar y representa la dispersión de los datos respecto al valor medio. Cuanto mayor sea el nivel de sigma y menor será la desviación estándar el proceso es mejor, más preciso y menos variable.

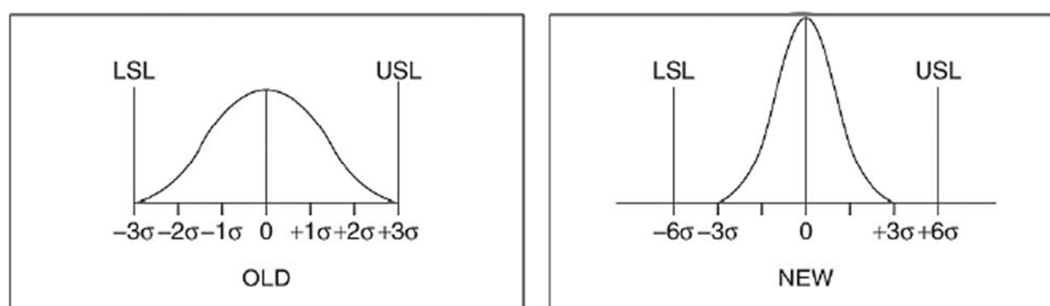


Figura 5.1. Cambio de un proceso tres sigma a seis sigma. Fuente: Pearlstein, 2006

Como muestra la Figura 5.1, cambiar de una calidad de tres sigma a un de seis sigma implica pasar de un rendimiento del 99,73% a uno del 99,9997%, o lo que es lo mismo, de 66800 defectos por millón a tan sólo 3,4. Se demuestra gráficamente en la Figura 5.2.

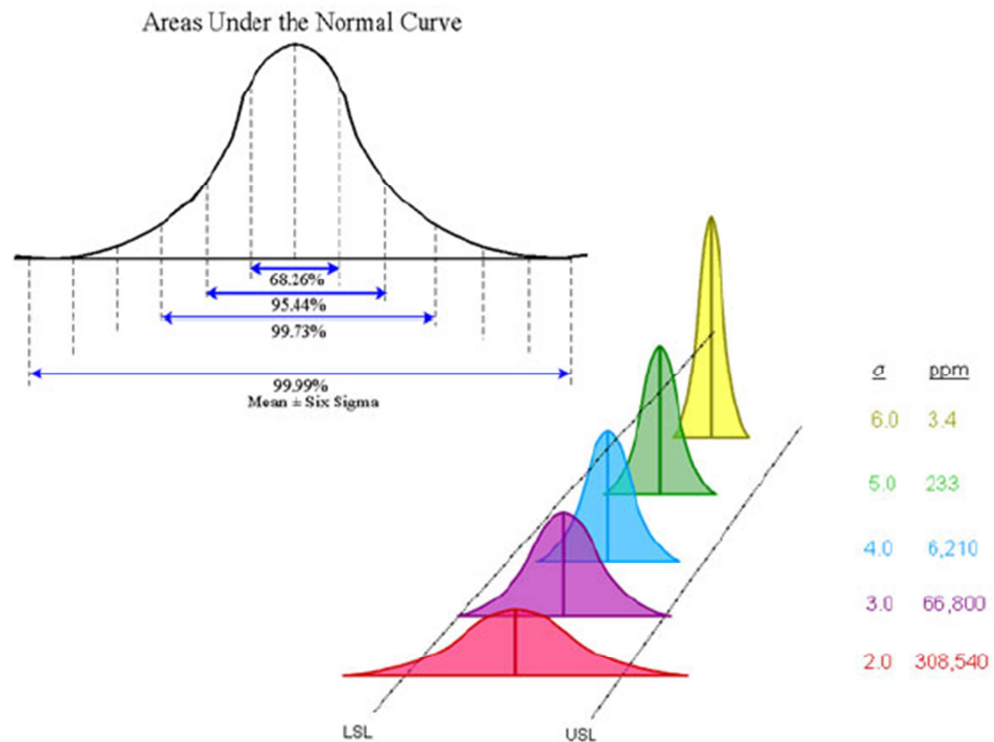


Figura 5.2. Demostración gráfica del nivel seis sigma. Fuente: El día, 2007

## 5.4. Principios de Six-Sigma

Los valores o principios en los que se basa la metodología Six-Sigma y hacen que esta funcione son seis:

### Principio uno: auténtica orientación al cliente

En Six-Sigma, la orientación al cliente es la prioridad número uno. Se necesita comprender las necesidades y expectativas de los clientes para poder mejorar. A su vez, los resultados que se obtienen también se miden según su impacto en la satisfacción del cliente y por su valor.

### Principio dos: gestión orientada a datos y hechos

Defiende que no se pueden basar decisiones en opiniones sino que para valorar el rendimiento del negocio es necesario aplicar los datos y hacer un análisis para comprender las variables clave y optimizar los resultados. Six-Sigma también ayuda a los directivos a dos preguntas esenciales que se han de responder mediante hechos: qué datos son necesarios y cómo los debo utilizar para obtener el máximo beneficio.

### Principio tres: orientación a procesos, gestión de procesos y mejora de procesos

Independientemente de la temática del proyecto de *Six-Sigma* la clave del éxito de éste es conocer el proceso de funcionamiento de la actividad. Dominar los procesos no es un mal necesario sino que se consiguen ventajas competitivas de cara a los clientes.

### Principio cuatro: gestión proactiva

Ser proactivo es lo contrario de ser reactivo, es decir, anticiparse a los acontecimientos. La gestión proactiva se fundamenta en definir objetivos que se revisan continuamente, establecer las prioridades de forma clara, centrarse en la prevención de los problemas y no en la manera de arreglarlos una vez ya han surgido y plantearse por qué motivo se hacen las cosas de una determinada manera. Constituye un punto de partida para la creatividad y el cambio efectivo. *Six-Sigma* abarca herramientas y prácticas que reemplazan los hábitos reactivos por un estilo de gestión dinámico, sensible y proactivo.

### Principio cinco: colaboración sin fronteras

Jack Welch, el presidente de General Electric y el impulsor del método *Six-Sigma*, ya defendió antes de ponerla en marcha que es imprescindible el trabajo en equipo tanto de arriba abajo como a través de las diferentes líneas de la organización. Requiere una comprensión tanto de las necesidades reales de los clientes como del flujo de trabajo en un proceso o cadena de suministro. A su vez, requiere una actitud que fomente el conocimiento de los clientes y procesos para beneficiar a todas las partes. Todo esto no es posible sin el trabajo en equipo.

### Principio seis: búsqueda de la perfección: tolerancia a los errores

Aunque pueda parecer una contradicción estas dos ideas son complementarias. Ninguna empresa podrá llegar cerca de *Six-Sigma* sin lanzar nuevas ideas y métodos, y esto siempre supone un riesgo. Las técnicas que se utilizan para mejorar rendimientos comprenden una dosis significativa de gestión del riesgo. La idea fundamental es que cualquier empresa que haga de *Six-Sigma* su objetivo tendrá que impulsarse constantemente para ser cada vez más perfecta puesto que el concepto “perfecto” para el cliente está en constante cambio.

## **5.5. Actores y roles del *Six-Sigma***

La estructura humana del *Six-Sigma* se compone de:

- Directores *Six Sigma* (*Champions o sponsors*): Gerente de la planta o del área, son los dueños de los problemas y establecen las prioridades. Es el responsable de garantizar el éxito de la implementación de *Six-Sigma* en sus áreas de influencia.



Define los objetivos estratégicos del programa, las responsabilidades, selecciona el proyecto y los equipos que formarán parte de él de acuerdo con el objetivo. También comunica y difunde el programa.

- Cinturones Negros Maestros (*Master black belts*): No siempre existen. Son expertos en las técnicas de *Six-Sigma* y en la implementación de proyectos. Juegan un gran papel en el entrenamiento y la asesoría en la ejecución de proyectos además de la promoción general de la filosofía *Six-Sigma*. Capacitan y dirigen a los expertos *cinturones negros* en su desarrollo como expertos *Six Sigma* ya que tienen una gran experiencia en el campo.
- Cinturones Negros (*Black belts*): Expertos técnicos que generalmente se dedican a tiempo completo a la metodología *Six Sigma*. Son los que asesoran, lideran proyectos y apoyan en mantener una cultura de mejora de procesos. Se encargan de capacitar a los *cinturones verdes*. También tienen la obligación de encontrar y proponer mejoras. Establecen objetivos de calidad, selección de proyectos, apoyo y supervisión de su ejecución.
- Cinturones Verdes (*Green belts*): Expertos técnicos que se dedican en forma parcial a actividades de *Six Sigma*. Se enfocan en actividades cotidianas diferentes de *Six Sigma* pero participan o lideran proyectos para atacar problemas de sus áreas. Sus proyectos son más reducidos en alcance que los del cinturón negro.
- Miembros del equipo (*Team Memembers*): son personas que ofrecen sus conocimientos y experiencia a tiempo parcial. Representan sus áreas ya sea que estén directamente o indirectamente involucradas en el proyecto. Ayudan a la realización de tareas relacionadas con el proyecto, encontrar ideas de mejora y sustentar resultados.

## 5.6. Proceso

Dentro de *Six-Sigma* existen diferentes metodologías las cuales son diferentes en fines y usos. A continuación se da una breve descripción de algunas de ellas:

-DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar): se utiliza para mejorar procesos ya existentes.

-DMADOV (Definir, Medir, Analizar, Diseñar y Verificar): se usa en el rediseño de procesos que no alcanzan la mejora aun siendo mejorados.

-IDOV (Identificar, Diseñar, Optimizar y Validar): se aplica a nuevos procesos o productos

que no existe medición alguna disponible.

-CQDFSS (Comercial, Calidad, Diseño, Para *Six-Sigma*): se utiliza para la búsqueda y aseguramiento en introducción de productos o servicios al mercado.

En el caso concreto que se estudiará en este proyecto se trata de una mejora de un proceso ya existente así que las etapas que se utilizarán serán las de DMAIC:

Definir: consiste en concretar el objetivo del problema o defecto y validarlo, a la vez que se definen los participantes del programa.

- Medir: consiste en entender cómo funciona actualmente el problema o defecto.
- Analizar: pretende averiguar las causas reales del problema o defecto.
- Mejorar: permite determinar las mejoras procurando minimizar la inversión a realizar.

Controlar: se basa en tomar medidas con el fin de garantizar la continuidad de la mejora y valorarla en términos económicos y de satisfacción del cliente.

A continuación se dará una descripción de cada una de estas fases junto con algunas herramientas que ayudan para su realización. Es importante destacar que aunque cada fase cuanta con diversos pasos y herramientas, no es necesario aplicarlas todas a un proyecto todo el tiempo. Además estas herramientas son muy flexibles dentro de su contexto y pueden ser adaptadas a cada problema.

## 5.7. Fase Previa

Para realizar con éxito un programa *Six-Sigma* es fundamental la selección adecuada de proyectos y la formación del equipo que atenderá cada uno de ellos. Por esto es necesario seguir los pasos que se describen a continuación.

Selección de un buen proyecto *Six-Sigma*. Es recomendable usar los criterios SMART, los cuales consisten en una serie de preguntas:

-Específico (*Specific*): ¿Está enfocado a un problema real del negocio?

-Medible (*Measurable*): ¿Es posible medir el problema, establecer una línea base y fijar metas para mejora?

-Alcanzable (*Attainable*): ¿Es la meta realizable? ¿La fecha de finalización del proyecto es realista?

-Relacionado (*Relevant*): ¿Se relaciona con un objetivo del negocio?

-Límite de tiempo (*Time bound*): ¿Se tiene una fecha de finalización del proyecto?

Es fundamental la formación del equipo. Una vez se tenga un proyecto, lo siguiente es seleccionar a la gente que integrará el equipo. Normalmente esta es tarea de los Champions o Black Belts y también de nombrar un líder que será un Black Belt o un Green Belt que aspire a estas categorías. Los demás miembros del equipo se deben elegir en base a lo que puedan aportar, ya que es necesario contar con diferentes puntos de vista, experiencias y especialidades.

### 5.7.1. D (Definir)

En la fase de definición se identifican los posibles proyectos *Six-Sigma*, evaluados por la dirección para evitar la inadecuada utilización de recursos. Se pueden crear grupos de trabajo. En esta fase se crea una carta donde se explica qué se va a realizar en el proyecto, nombre del proyecto, objetivo, voz del cliente. Una vez seleccionado el proyecto, se prepara y se selecciona el equipo más adecuado para ejecutarlo, asignándole la prioridad necesaria. Esta fase establece la expectativa para el proyecto y mantiene el enfoque de la estrategia *Six-Sigma* a los requerimientos del cliente.

Las actividades y herramientas que se tienen en esta etapa son:

- Planteamiento del problema
- Definición de los recursos
- Paretos que determinan la condición actual
- Mapa del proceso
- Voz del cliente

### 5.7.2. M (Medir)

La fase de medición consiste en la caracterización del proceso identificando los requisitos clave de los clientes, las características del producto (o variables del resultado) y los parámetros (variables de entrada) que afectan al funcionamiento del proceso y a las características o variables clave. Permite entender la condición actual del proceso antes de intentar identificar mejoras. Se determinan cuáles son las características de calidad del producto o servicio críticas para el cliente, conocidos como CCC o, en inglés, CTQ (*Critical to Quality*). La segunda parte de la medición se centra en identificar las variables que regulan el funcionamiento del proceso y condicionan su resultado. A partir de esta

caracterización se define el método para recoger datos sobre el funcionamiento actual del proceso, se recolectan dichos datos y se mide la capacidad del proceso en su situación actual, punto de partida para evaluar las posteriores mejoras conseguidas. Así, el equipo identifica oportunidades de mejora centradas en actividades que, sin añadir valor al resultado, consumen tiempo y recursos.

Las actividades y herramientas que se tienen en esta etapa son:

- Recolectar los datos
- Determinar la capacidad del proceso y el nivel sigma
- Diagrama de causa y efecto
- Diagrama de flujo del proceso

### **5.7.3. A (Analizar)**

En la fase de análisis, el equipo evalúa los datos de resultados actuales e históricos recopilados en la fase anterior. Se examinan los datos con el objetivo de generar una lista de prioridades de las fuentes de variación. Aquí se pasa del problema real al problema estadístico. Para ello se desarrollan y comprueban hipótesis sobre posibles relaciones causa-efecto utilizando las herramientas estadísticas pertinentes. De esta forma el equipo confirma los determinantes del proceso, es decir las variables clave de entrada (más probables responsables de la variación) de las triviales (menos probables responsables de la variación) que afectan a las variables de respuesta del proceso.

Las actividades y herramientas que se tienen en esta etapa son:

- Análisis de multi-variable
- Diagramas de dispersión
- Análisis de regresiones
- Pruebas de hipótesis
- Diseño de experimentos

#### 5.7.4. I (Mejorar)

En la fase de mejora (*Improve*) el equipo trata de determinar la relación causa-efecto (relación matemática entre las variables de entrada y la variable de respuesta que interese) para predecir, mejorar y optimizar el funcionamiento del proceso. Se confirma que la solución propuesta va a alcanzar o a exceder las metas de mejora de calidad del proyecto. Lo que se pretende en esta fase es mediante el ingenio y la imaginación, teniendo como base el conocimiento del proceso, es conseguir acciones que al implantarlas se consiga optimizar el proceso y que den un resultado cuantificable positivo. En esta fase se prueba la solución a pequeña escala en un ambiente real de negocio. Esto asegura que se ha llegado a la función que relaciona las causas con los efectos y la solución funcionará cuando sea implementada por completo.

Las actividades y herramientas que se tienen en esta etapa son:

- Lluvia de ideas
- Métodos a prueba de errores
- Matriz de prioridades

#### 5.7.5. C (Controlar)

La fase de control consiste en diseñar y documentar los controles necesarios para asegurar que lo conseguido mediante el proyecto *Six-Sigma* se mantenga una vez que se hayan implementado los cambios. Se asegura que las mejoras del proceso, una vez implementadas, serán sostenidas y que el éste no se va a revertir a su estado anterior. Adicionalmente, permite que se comparta información que puede acelerar mejoras similares en otras áreas. Cuando se han logrado los objetivos y la misión se dé por finalizada, el equipo informa a la dirección y se disuelve. Pasado un tiempo se puede retomar el proyecto y redefinirlo ya que se basa en una mejora continua de los procesos basándose en el ciclo PDCA.

En esta fase deben responderse las siguientes cuestiones: Para las variables ajustadas

- Cálculo del nivel sigma del proceso
- Cálculo de ahorros y costos
- Plan de control
- Cálculo de capacitación

## 5.8. Resultados

Tras la implementación de un programa *Six-Sigma*, se obtienen resultados por dos caminos distintos. El primero de ellos es que se mejoran las características del producto o servicio ofrecido permitiendo aumentar los ingresos. El segundo se produce por consecuencia del anterior y es el ahorro de costos que se deriva de la disminución de fallas o errores y de los menores tiempos de ciclo en los procesos.

Si el promedio del proceso es mayor al valor meta, entonces el proceso está centrado, de lo contrario se dice que está descentrado. El nivel de calidad puede ser expresado como  $k$  sigma, en donde  $k$  se obtiene de dividir la mitad de la tolerancia entre la desviación estándar del proceso.

## 6. ESTUDIO DEL PROYECTO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX-SIGMA

Ahora se aplica el método explicado en el punto anterior al proyecto de las máquinas empaquetadoras. Se pasará fase por fase detallando los pasos que se han seguido. Las tres primeras se han podido llevar a cabo mientras que las dos últimas son sólo propuestas de lo que se debería hacer ya que han sido teóricas.

### 6.1. DEFINIR

En esta primera etapa se detalla la problemática del proyecto, se definen los recursos que se emplearán para llevarlo a cabo y se estudia el proceso que engloba el proyecto para conocer mejor cada una de las fases. Por último se define la característica crítica de calidad y se plantean los objetivos.

#### 6.1.1. Planteamiento del problema

Existen tres máquinas trscanadoras de cable que producen con una alta variabilidad. La función de estas máquinas es pasar cable de una bobina de origen a otras de destino. Cada vez que se obtiene una nueva bobina de destino se dice que se ha producido un nuevo corte. Cada corte equivale a un pedido del cliente. Lo que se pretende en el proyecto es disminuir la variabilidad de la producción de dichos cortes. Se quiere identificar cuáles son los factores que hacen que se dispare la variabilidad y buscar una solución para disminuirla lo máximo posible.

Las características más relevantes que definen y diferencian las tres máquinas son:

- Trscanadora 5 (TR5): es la más nueva de las máquinas y solo permite trscanar cable de diámetro pequeño. Es la menos utilizada.
- Trscanadora 3 (TR3): es la más potente de todas y permite trscanar todo tipo de cable aunque está especializada en los de diámetro más grande. En algunas ocasiones que ha habido más trabajo o alguna de las otras máquinas se ha estropeado se ha hecho servir para diámetros pequeños.
- Trscanadora 4 (TR4): trscana diámetros medios y pequeños. Es más universal que la TR5 por lo que se prioriza el uso de la TR4 para mantener la otra apagada.

### 6.1.2. Definición de recursos

La información necesaria para llevar a cabo el proyecto se obtendrá a partir de boletines que rellenan los operarios en cada turno de trabajo y por cada máquina. En ellos figura la información que se detalla en la Figura 6.1:

		Fecha	
Operario	Turno	Máquina	
Bobinas de origen	Bobinas de destino	Artículo trascanado	Longitud del cable
		Horas de trabajo	

Figura 6.1. Plantilla de recogida de datos de las máquinas trascanadoras

Por lo tanto, los datos que se obtienen son los siguientes:

Número de cortes, longitud del cable en metros, número de cambios de artículo que se han producido, operario a cargo de la máquina, máquina en la que ha trabajado, turno, longitud media de los cortes, longitud máxima, longitud mínima y horas que ha estado funcionando la máquina.

En cuanto a la repartición de roles del *Six-Sigma*, el Sr. Julián Romero y el Sr. Josep A. Sánchez serán los directores o *Champions* supervisando el proyecto y asegurando su éxito, mi papel será el de *Green Belt* desarrollando el proyecto, proponiendo mejoras y marcando los objetivos de calidad. Por último, los operarios y encargados de la planta que conozcan el



proceso productivo serán miembros del equipo ya que representarán sus áreas. También ayudarán a la realización de tareas relacionadas con el proyecto como encontrar ideas de mejora y sustentar resultados.

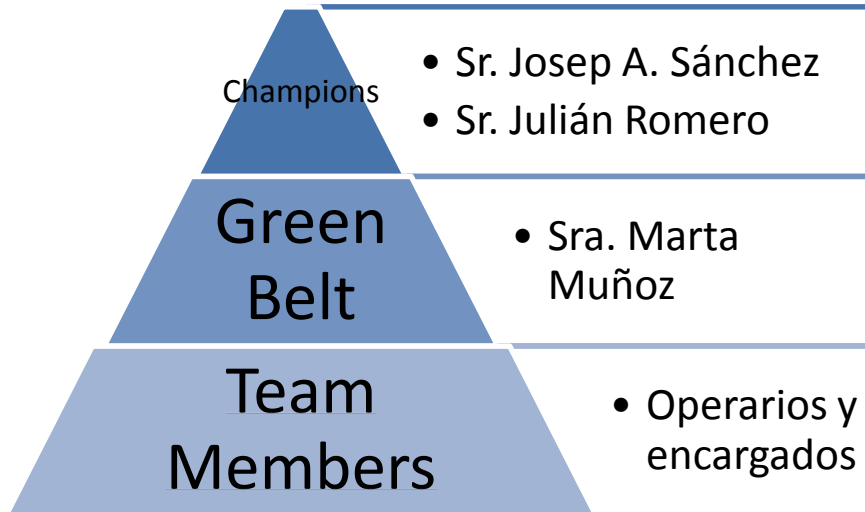


Figura 6.2. Pirámide jerarquía de los roles del Six-Sigma

En la Figura 6.2 se representan gráficamente los roles que se han descrito anteriormente.

### 6.1.3. Mapa del proceso

Una vez se ha fabricado el cable que demanda el cliente se dispone a envasarlo para servirlo. El proceso de trascanado empieza dando la orden al carretillero del almacén de que se ha de servir el material. El carretillero busca la bobina fabricada en el stock y la lleva hasta la trascanadora que le corresponda al material, que varía según el diámetro del cable. La fabricación no se planifica con tiempo sino que es el mismo torero el que decide según la prioridad del material en qué orden se envasarán los cables ya que los pedidos llegan con un plazo de entrega casi inmediato. Una vez se ha finalizado el trascanado, la bobina de destino acabada se dispone para ser enviada mientras que la bobina de origen vuelve al almacén ya sea vacía o parcialmente llena. En ocasiones la bobina de origen permanece en la máquina para continuar envasando el mismo material.

Para estudiar en más profundidad el proceso se propone realizar un diagrama SIPOC:

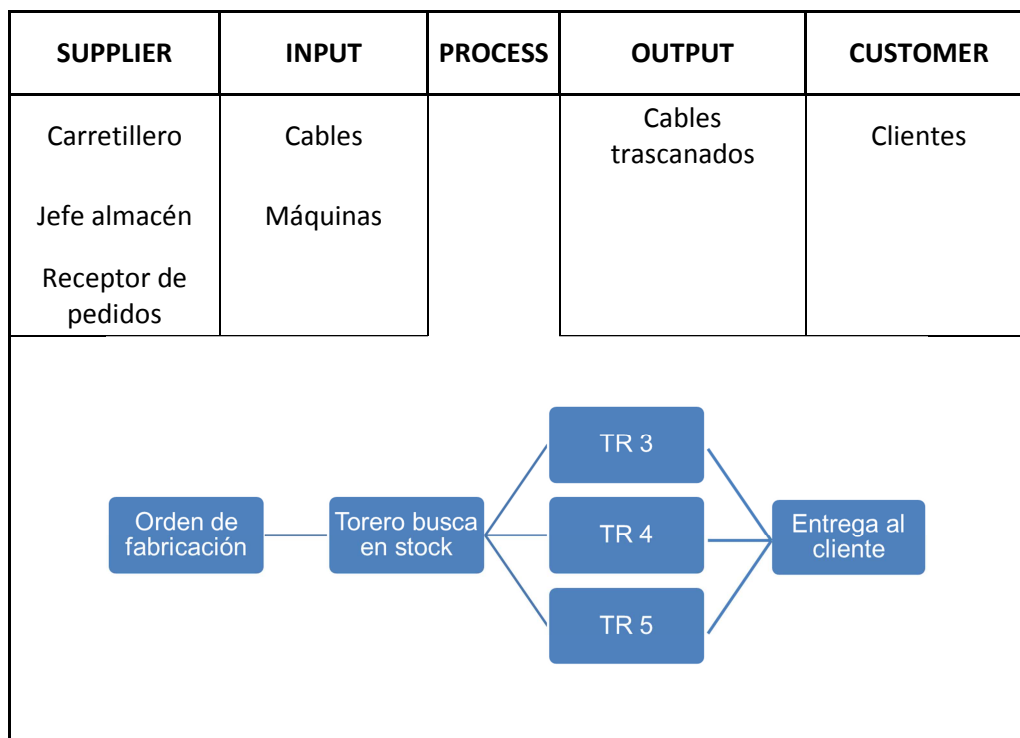


Tabla 6.1. Diagrama SIPOC del proceso de trascanado del cable. Fuente: Elaboración propia

El proceso descrito anteriormente se representa gráficamente en la Tabla 6.1.

#### 6.1.4. Característica crítica de calidad y objetivos

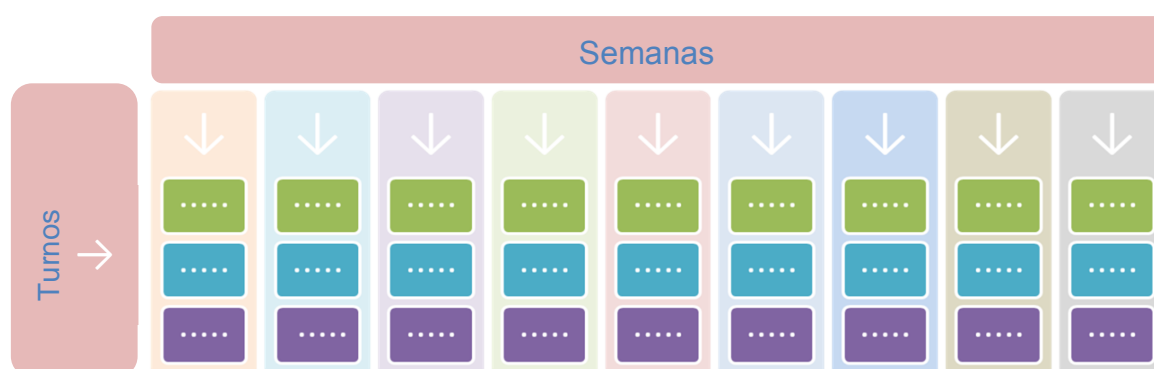
La característica crítica de calidad será la variabilidad de los cortes que efectúan las máquinas. Ésta se medirá siempre diferenciando las máquinas, ya que al ser distintas no se pretende que en todas se consiga el mismo resultado. Si se considera que en una sesión se cuantifica el número de cortes realizado e interesa actuar sobre la variabilidad del número obtenido, queda claro que es necesario agrupar diferentes sesiones para obtener valores de esta variabilidad. Así pues, la variabilidad se cuantificará de tres maneras: por semanas, por turnos y por periodos de una semana diferenciando turnos.

El objetivo principal del proyecto será disminuir la variabilidad del proceso. Como objetivo secundario se establece también maximizar la productividad de dichas máquinas, por lo que aparece una segunda característica crítica de calidad. Ésta se medirá igual que la varianza.

## 6.2. MEDIR

Se parte de los datos recogidos durante los meses de marzo y abril en la empresa. No se ha planteado una recogida extra de información posterior a este periodo para la realización del presente trabajo. Sin embargo, para obtener resultados más fiables se consideraría apropiado diseñar una plantilla de recogida de datos más completa y completar la muestra con nuevos datos. Los datos muestran la producción que se ha hecho a lo largo de un turno en una máquina determinada. Se han introducido en una hoja Excel y sólo se tendrán en cuenta para el estudio aquellos en los que se haya trabajado las 8 horas que dura un turno, ya que algunos días la máquina sólo ha funcionado unas pocas horas. En un principio se pensó en estandarizarlos pero se pudo comprobar que éstos se inflaban y no eran realistas. La producción que se realiza en un turno será considerada una sesión. Como se ha mencionado anteriormente, será necesario agrupar sesiones para obtener valores de variabilidad. En el Anexo A se pueden ver todos los datos recogidos.

Para entender mejor cómo se agruparan los datos para su estudio se ha elaborado la *Figura 6.3*:



*Figura 6.3. Agrupación de los datos para realizar el estudio. Fuente: Elaboración propia*

Para poder analizar los datos se agruparan los datos de distintas maneras:

1. Por turnos: Son los grupos que están representados horizontalmente con el mismo color. Hay tres grupos, el primer turno que se corresponde con el color verde, el segundo de azul y el tercero con el lila. Son grupos con numerosas observaciones.
2. Por semanas: Son los nueve grupos que se representan verticalmente con colores pastel. No se tienen tantas observaciones como en el caso de los turnos.

3. Por semana-tuno: Son cada uno de los turnos por cada semana. En el esquema son cada una de las unidades. Son los que menos observaciones tienen y por eso en algunos casos no se tienen suficientes datos para estudiarlo.

La dificultad de este estudio se encuentra en que al agruparse los datos por turnos se obtienen solamente tres muestras pero muy robustas, al tratarse de variabilidades, calculadas con numerosos datos. A medida que se van disgregando los grupos se obtienen más muestras pero de menor robustez.

### **6.2.1. Definición de las covariables estudiados**

Se comienza por definir las covariables que se estudiarán en los siguientes puntos así cómo cuáles serán sus abreviaturas para hablar de ellos con más claridad. Puesto que ha sido necesario agrupar los datos de diferentes sesiones para obtener la CCC, a la hora de trabajar las covariables también aparecen medidas resumen de éstas (como la media y la desviación estándar).

- sdCortes: desviación estándar de los cortes de producción que se producen en un turno. Es la característica crítica de calidad
- medCortes: media de los cortes de producción que se producen en un mismo turno. Es la característica crítica de calidad secundaria.
- sdCambios: desviación estándar de los cambios de artículo que se producen en una misma máquina durante un turno.
- medCambios: media de los cambios de artículo que se producen en una misma máquina durante un turno.
- sdMetros: desviación estándar de la suma de longitudes de cada una de las bobinas que se trasecan en una misma máquina durante un turno.
- medMetros: media de la suma de longitudes de cada una de las bobinas que se trasecan en una misma máquina durante un turno.

### **6.2.2. Estudio temporal de las características críticas de calidad**

El estudio comenzará por el análisis temporal para presentar la evolución de la producción a lo largo del tiempo y poder tener una idea aproximada de cuál es la situación inicial. Hay que remarcar que hay máquinas que no han funcionado todos los turnos y días, o que han trabajado pero no en un turno completo y por lo tanto se descartan.

### 6.2.2.1. Cortes por máquina

Para tener una primera idea de cómo están distribuidos los datos se procede a hacer un diagrama de puntos de los cortes que se producen por cada día y turno.

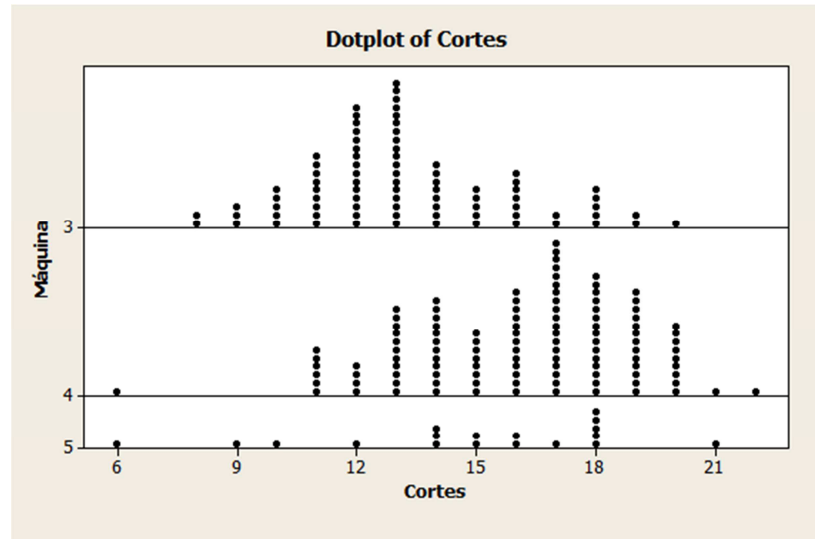


Figura 6.4. Dotplot de cortes por máquina. Fuente: Elaboración propia

Lo primero que se observa en la Figura 6.4 es que el grosor de los datos corresponde a las TR3 y TR4 mientras que de la TR5 apenas se tienen observaciones. La TR3 produce con una media de cortes inferior a la TR4. Además se aprecia que la TR3 está descentrada hacia la izquierda mientras que la TR4 hacia la derecha.

### 6.2.2.2. Cortes por turno

Una vez se ha visto la distribución general de los puntos se procede a estudiar la variancia y media agrupando los datos por turnos. Se comienza representando un diagrama de puntos.

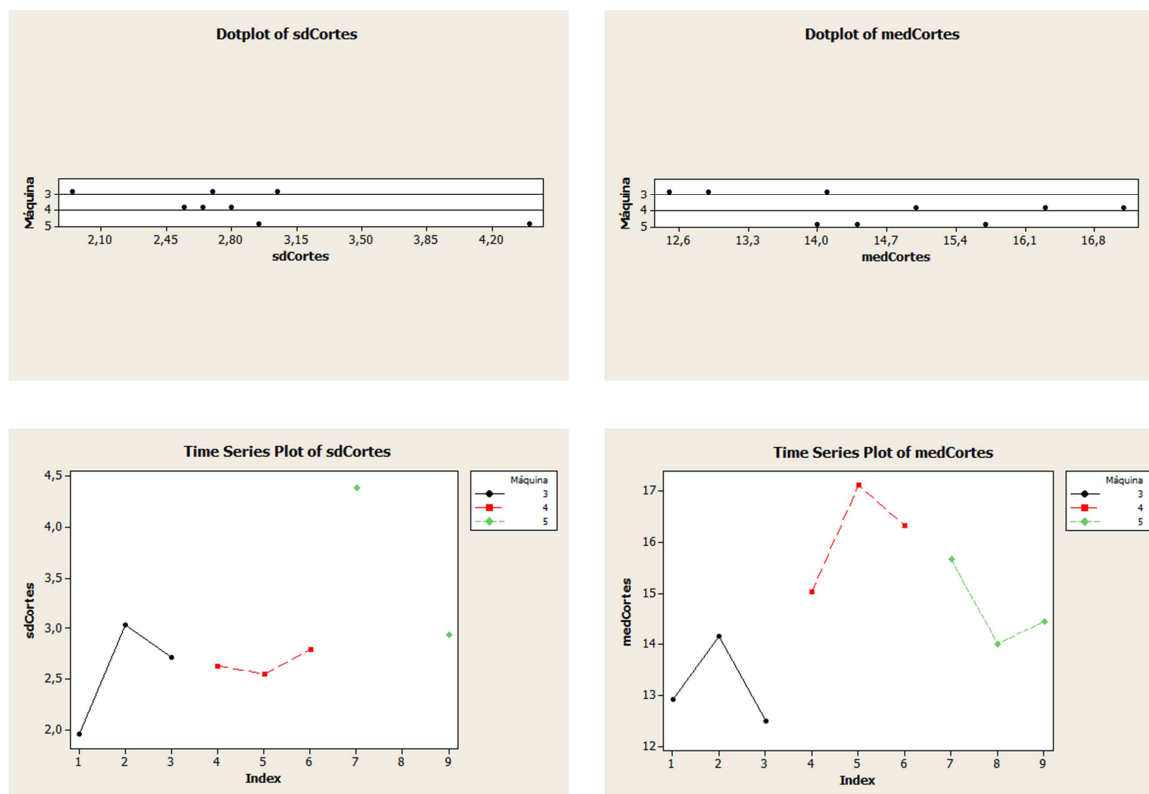


Figura 6.5. Dotplot y Time series plot de Cortes por turno. Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de puntos de la Figura 6.5 se observa que la máquina 4 es la que tiene los puntos más concentrados, por lo tanto, es la que menos cambia su desviación estándar de un turno a otro. De la máquina 5 no se puede comentar mucho ya que sólo se tienen dos observaciones y en cuanto a la máquina 3 la dispersión de los puntos es mucho mayor que en la 4.

Por lo que se refiere a la media de producción de cortes que también se muestra en la Figura 6.5 se observa que la trascanadora 4 es la que obtiene valores más altos, seguida de la 5 y por último la 3. La dispersión de los puntos es muy similar en las tres máquinas.

Respecto a la variancia entre turnos que se muestra en la Figura 6.5 se puede comentar que mientras que la trascanadora 4 muestra valores que parecen no depender del turno que se considera, la trascanadora 3 sí que obtiene valores de variabilidad de cortes más bajos en el primer turno, mientras que en el segundo se obtienen los máximos. La máquina 5 presenta una variabilidad mayor y no se tienen datos del segundo turno.

En cuanto a la media de producción de cortes por turno que se muestra en la *Figura 6.5*, se observa un patrón similar en las TR3 y TR4 en la que el turno 2 es el más productivo mientras que en la TR5 es al revés, dónde en el turno de tarde es el que menos producción consigue.

### 6.2.2.3. Cortes por semana

Se seguirá el mismo esquema para analizar los cortes por semana que en el apartado anterior.

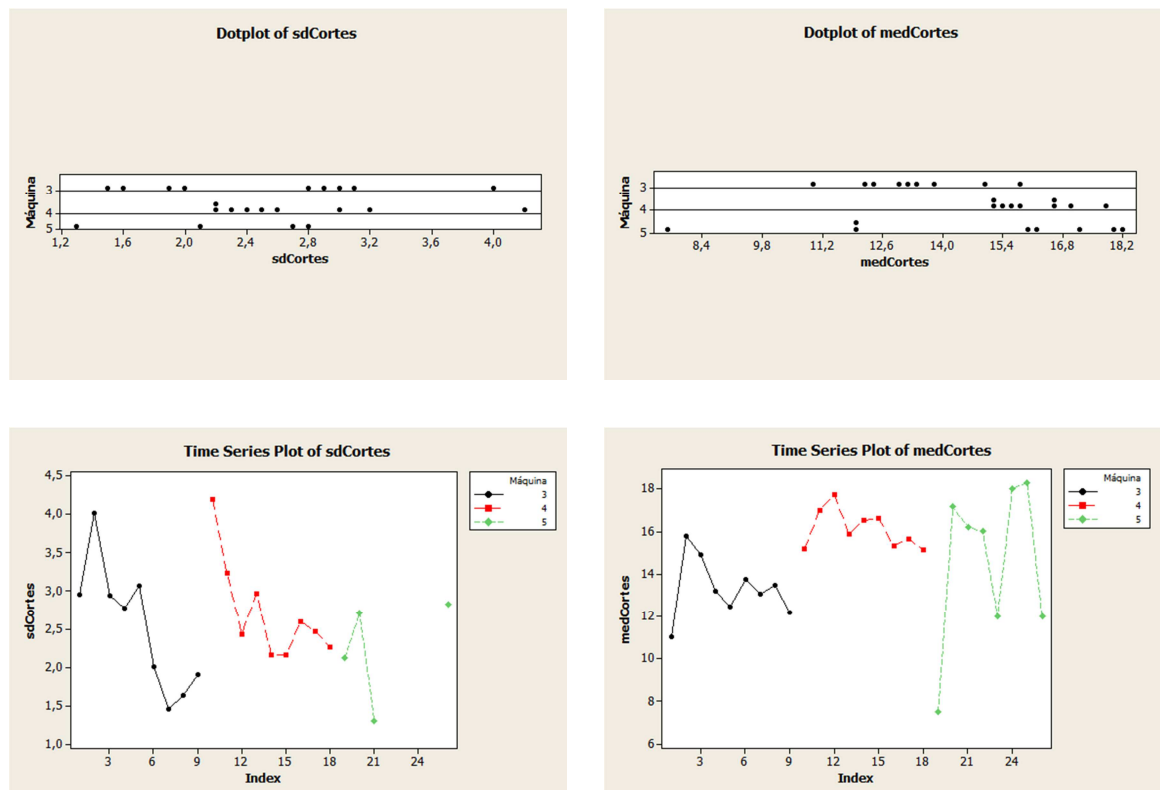


Figura 6.6. Dotplot y Time series plot de Cortes por semana. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.6 se muestra la desviación típica de cada conjunto de datos que se corresponden a un periodo de una semana. El caso ideal serían datos poco dispersos y de valor bajo.

-TR3: Se observan valores bajos y altos. Hay cuatro valores entorno el 1,5 y el 2 y cuatro valores más entre el 2,8 y el 3,2. Además se observa un valor aislado de 4.

-TR4: En este caso los valores están menos dispersos aunque no se obtiene ninguno tan

bajo como en la TR3. Se mueven aproximadamente entre el 2,2 y el 3,2. Se vuelve a encontrar un valor aislado que se dispara hasta el 4,2.

-TR5: Hay menos observaciones que para las dos otras máquinas. Tres de estos valores se encuentran entre el 2,1 y el 2,8. En este caso el valor aislado es más bajo que la mayoría y se encuentra en el 1,3.

En la Figura 6.6 se muestra la media de cada conjunto de datos que se corresponden a un periodo de una semana. El caso ideal serían datos poco dispersos y de valor alto.

-TR3: El rango de valores oscila entre 11 y 15,9. El conjunto es algo disperso pero no se observan valores aislados.

-TR4: Es el mejor caso de los tres. Los datos están agrupados entre 15,1 y 17,9. No solo son compactos sino que además son elevados.

-TR5: Igual que con la desviación típica de esta máquina se tienen menos observaciones. Se pueden ver dos grupos diferenciados de valores. El primer grupo se corresponde con unos valores relativamente altos y poco dispersos, entre el 16 y el 18,2. El segundo grupo de valores son dos únicas observaciones de valor idéntico: 12.

Para poder identificar a qué semana corresponde cada punto y tener una idea de cómo están distribuidos se muestran dos diagramas de dispersión: el primero de las desviaciones típicas y el segundo de las medias.

En el gráfico temporal de la Figura 6.6 se muestra la evolución de las 9 semanas que dura el estudio. Las cinco primeras corresponden al mes de marzo mientras que las cuatro últimas al mes de abril. En las máquinas 3 y 4 se muestra claramente que en el primer mes los valores de desviación han sido más altos que en el segundo. De la máquina 5 no se tienen prácticamente datos pero en conjunto se observa que en conjunto parecen estar menos dispersos que para las otras dos máquinas.

En cuanto a la media de los datos por semanas de la producción de cortes se observa que tanto en la en la máquina 3 y 4 los valores más altos se registran en la segunda y tercera semana. Mientras que las otras permanecen más o menos constantes. En la máquina 5 se observa un claro valor mínimo la primera semana. Presenta mucha más variabilidad en la media de cortes que se producen cada semana.



En las máquinas 3 y 4 se registra un comportamiento que llama la atención la segunda y tercera semana ya que son en las que se registran los valores máximos de variabilidad y de producción. Una posible interpretación sería que estas dos semanas se corresponden a las dos semanas anteriores a semana santa y la empresa recibió muchos pedidos que debía servir antes de esa fecha. Al intentar hacer más producción también se obtiene una mayor desviación de los cortes.

#### 6.2.2.4. Cortes por semana-turno

De igual manera que en los apartados anteriores se comenzará por mostrar el diagrama de puntos de los datos:

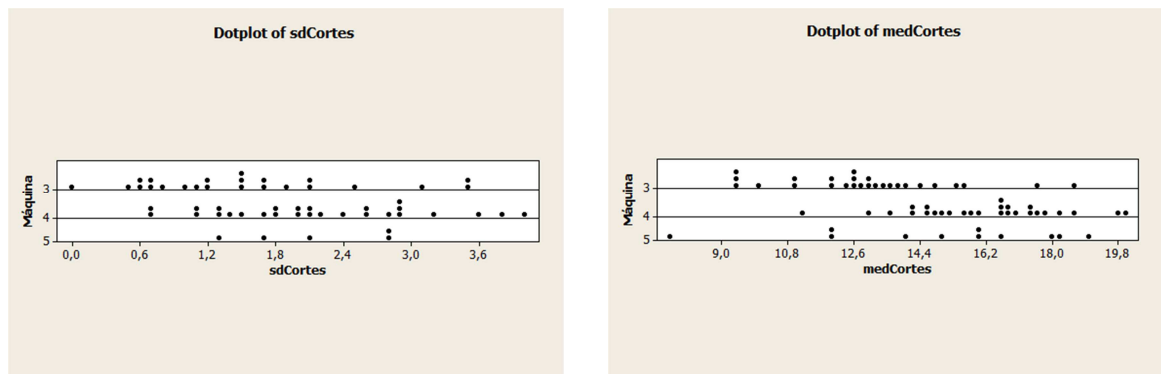


Figura 6.7. Dotplot de Cortes semana-turno. Fuente: Elaboración propia

La agrupación de los datos que se observa en la Figura 6.7 de las dos primeras máquinas es muy parecida, lo que cabe destacar es que los valores de la TR3 son ligeramente inferiores a los de la TR4. Los valores de la TR5 están más agrupados pero también puede ser debido a que hay menos observaciones.

Por lo que se refiere a la media de producción de cortes que se puede observar en la parte derecha de la Figura 6.7, la distribución en las dos primeras máquinas igual que pasaba con la desviación estándar es muy similar, aunque en la 4 se obtienen valores ligeramente más altos. En la máquina 5 la agrupación es muy similar exceptuando un dato que es mucho inferior al resto.

A continuación en la Figura 6.8 se muestra el diagrama temporal que muestra la evolución de los datos. Hay que destacar que no todas las máquinas han trabajado todos los turnos y que algunos datos se han descartado por lo corresponder a turnos enteros de 8 horas. Esto hace que no se tengan realmente 8 muestras por turno sino en algunos casos ninguna o

sólo una por lo que la desviación estándar es imposible de calcular.

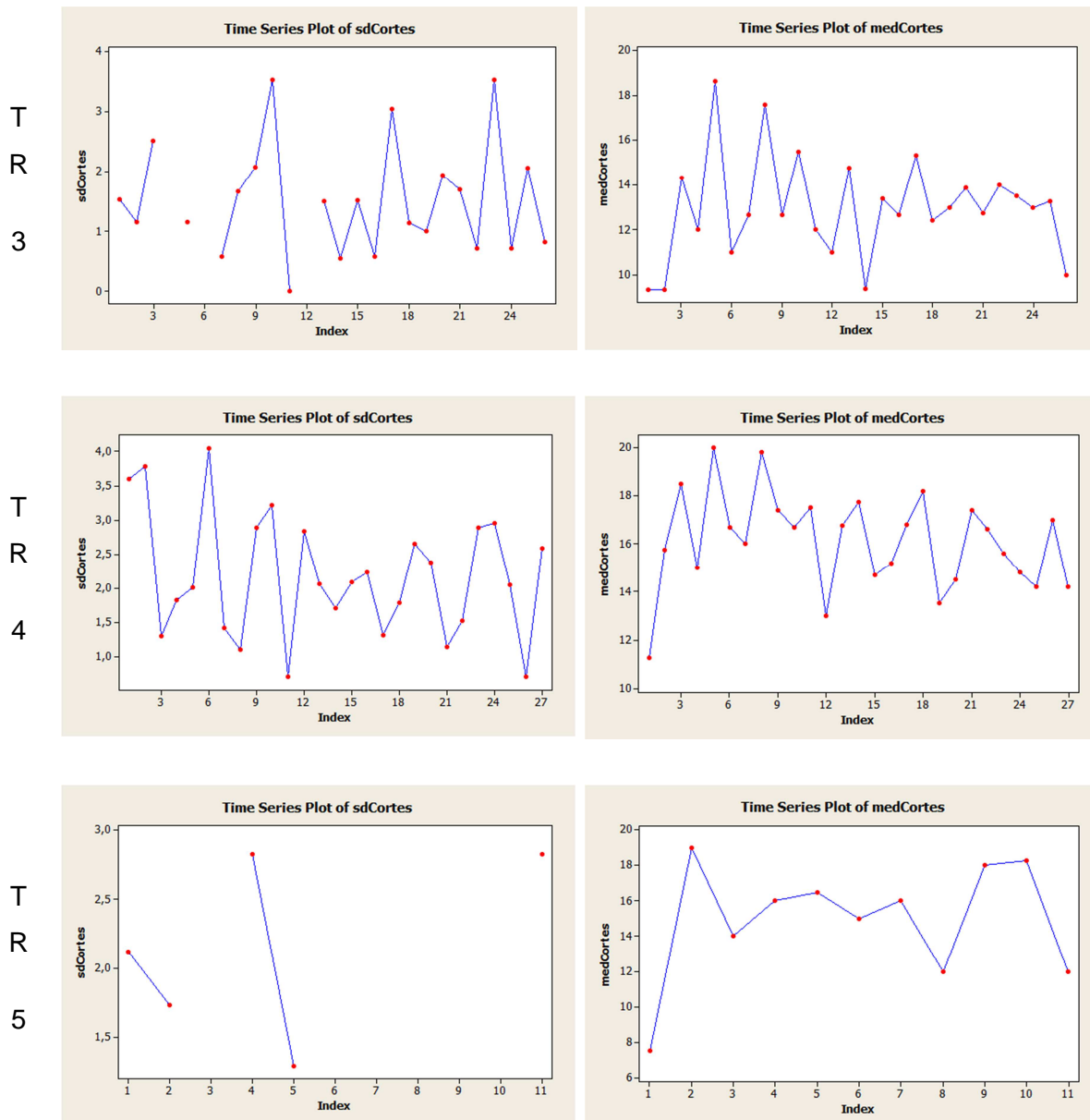


Figura 6.8. Time series plot de Cortes por semana-turno. Fuente: Elaboración propia

La desviación estándar en la máquina 3 se mantiene considerablemente uniforme a excepción de tres valores que despuntan (turno 1 semana 3, turno 3 semana 5 y turno 3 semana 7).

En la máquina 4 se observa unos valores extremos en la primera mitad del periodo mientras que en la segunda mitad los datos son más constantes y sin valores extremos.

De la máquina 5 no se puede prácticamente nada puesto que apenas hay 5 observaciones. El tercer y último valor son claramente más elevados que los otros tres.

La media de producción de la máquina 3 tiene más oscilación en la primera mitad de las observaciones que en la segunda. Por otro lado, los valores máximos se obtienen en lo que se corresponden con la semana 3 y 4 mientras que los mínimos se localizan al principio y final del periodo.

Por lo que respecta a la máquina 4 tanto la variabilidad de la media como los valores se mantienen uniformes a lo largo de todo el periodo. Se encuentra un valor mínimo destacable en la primera observación.

Por último, la TR5 tiene un comportamiento bastante homogéneo que comienza de unos valores de producción mínimos, aumenta en el centro de las muestras y acaba disminuyendo ligeramente.

### **6.2.3. Búsqueda de posibles covariables que afectan a la característica crítica de calidad**

Para comenzar a buscar las covariables que son afectan a la variabilidad del número de cortes, se procede a relacionar la desviación estándar de la característica crítica de calidad principal con dichas covariables mediante diagramas de dispersión, que se muestran en el Anexo B.

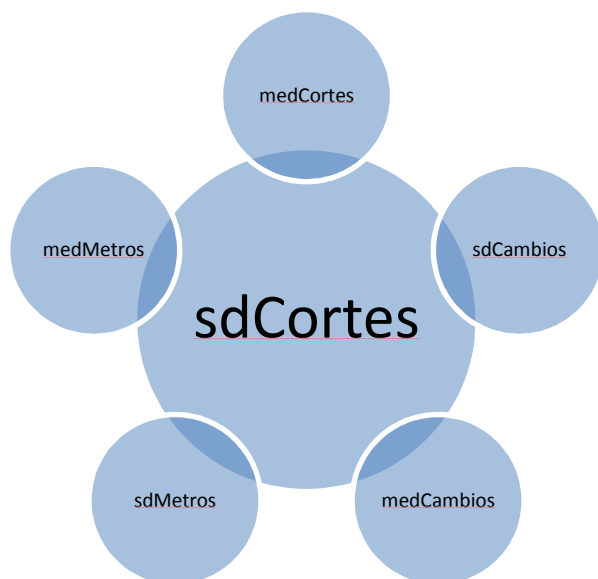


Figura 6.9. Esquema de las covariables que podrían afectar a la característica crítica de calidad. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.9 se muestra cuáles son las covariables que se estudiarán y que han sido escogidos según los datos que se tenían de las plantillas de recogida de datos.

Igual que en el análisis temporal se estudiarán por separado los datos agrupados por turno, semana y semana-turno.

#### 6.2.3.1. Cortes por turno

Se empieza mirando posibles interacciones entre la desviación estándar de la producción de cortes con la media de la producción de cortes. Se muestran las observaciones principales de los diagramas de dispersión:

El gráfico de relación que muestra la desviación típica de la producción de cortes por la media de la producción de cortes en cada máquina se tiene que para ninguna de ellas se encuentra ninguna relación. Tampoco se ve un comportamiento similar para las diferentes máquinas.

Ahora se procede a estudiar la posible interacción de la desviación típica de la producción de cortes con la desviación típica de los cambios de artículo por turno. Para la máquina 4 la desviación estándar de los cortes es independiente a la desviación de los cambios de artículo ya que se forma una recta horizontal. Para las otras dos máquinas no se ve ninguna tendencia.

De igual manera que en el gráfico anterior, el de la desviación típica de los cortes de la máquina 4 es independiente de la media de los cambios de artículo. En cuanto a la máquina 3 los puntos están colocados de tal manera que no se puede encontrar ninguna relación y en la 5 sólo figuran 2 puntos por lo cual no se puede establecer relación alguna.

En el gráfico de dispersión que relaciona la CCC con la sdMetros, para la trscanadora 3 se puede observar como los puntos tienden a formar una línea decreciente. Esto significa que, en cuanto a las desviaciones típicas entre turnos, al aumentar la de las longitudes de bobinas que se fabrican disminuye la de los cortes. Esto significa que al producir con más variabilidad de tamaños de bobina, la variabilidad de producción de cortes disminuye. En cuanto a la máquina 4 parece que estos dos factores son independientes. Por lo que respecta a la máquina 5 al producir con una misma variabilidad de longitud de bobinas se obtienen desviaciones de cortes diferentes, por lo tanto tampoco están relacionados los factores para esta máquina.

En ninguna de las máquinas parece ser que la media de la longitud de las bobinas que se producen sea una covariable que haga variar la desviación típica de la producción de cortes.


	medCortes	sdCambios	medCambios	sdMetros	medMetros
TR3					
TR4					
TR5					

Tabla 6.2. Resumen de las covariables influyentes para los datos agrupados por turno.  
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.2 se puede observar un resumen de las covariables significativos para cada máquina de los datos agrupados por turnos. En este caso, sólo sdMetros es significativo para la máquina 3.

#### 6.2.3.2. Cortes por semana

A continuación, se pasa a estudiar el comportamiento de la desviación típica agrupando los datos por semanas. Al tener más datos se representan los diagramas de dispersión con sus

líneas de regresión para que sean más fáciles de interpretar.

Se comienza relacionando la desviación típica de la producción de cortes con la media de la producción de cortes por periodos de una semana. En las máquinas 3 y 4 parece verse una pequeña tendencia pero es debida a que en ambas hay una observación de mucho peso y hace variar la pendiente de la recta. En cuanto a la máquina 5, la recta es horizontal por lo que la media de los cortes no es una covariable que haga variar la desviación típica. Por lo tanto, se puede decir que en ninguna de las máquinas ésta es significativa.

La desviación estándar de los cambios de artículo por semana parece afectar a la desviación de los cortes por semana en la máquina 4. Al aumentar la primera aumenta también la segunda, es decir, cuando se producen muchos cambios de artículo la variabilidad de los cortes también aumenta. Al querer minimizar la variabilidad de los cortes, el caso ideal para la máquina 4 es que se produzcan el mínimo de cambios de artículo posibles. En cuanto a la TR3 y TR5 no parece observarse ninguna relación entre los dos factores.

En cuanto a la covariable media de cambios de se tiene lo siguiente: en la máquina 3 se observa una recta de regresión con pendiente negativa que está fuertemente influenciada por un punto en la parte superior izquierda. Sin este punto no se vería esta recta tan marcada por lo que se debe estudiar en más profundidad. Por lo que respecta a las otras dos máquinas no se observa que sea influyente la media de los cambios de artículo en la desviación típica de los cortes.

En la desviación de longitudes de bobinas respecto a la desviación de producción de cortes, la máquina 5 se observa que al aumentar la variancia de la longitud de las bobinas que se producen disminuye la variancia de los cortes. Aunque sólo se tienen cuatro observaciones parece que la tendencia es clara. En las otras dos máquinas parece no afectar esta covariable.

La media de la longitud de las bobinas producidas interactúa sólo en la máquina 3 con la desviación estándar de la producción de cortes. Aun así, la nube de puntos está muy concentrada y hay un punto muy influyente que le da este aspecto de recta vertical. Se debería estudiar con más detenimiento. Para las otras dos máquinas, las longitudes de las bobinas no afectan.

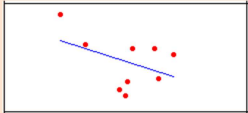
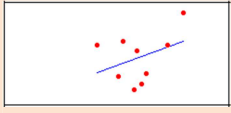
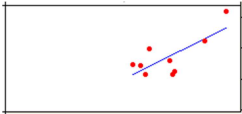
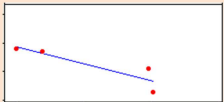
	medCortes	sdCambios	medCambios	sdMetros	medMetros
T R 3					
T R 4					
T R 5					

Tabla 6.3. Resumen de las covariables influyentes para los datos agrupados por semana.  
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.3 se puede observar un resumen de las covariables significativos para cada máquina de los datos agrupados por semana. En este caso, medCambios y medMetros son significativos para la máquina 3, sdCambios para la 4 y sdMetros para la máquina 5.

### 6.2.3.3. Cortes por semana-turno

Por último, se estudian las posibles relaciones agrupando los datos por semana y turno. Esto conlleva tener muchas observaciones por lo que será más fácil encontrar alguna interacción. Igual que se ha hecho en el caso de los datos agrupados por semanas, en los gráficos de dispersión se añadirá una recta de regresión que muestre la tendencia de los puntos.

Las desviaciones estándar de la producción de cortes de las máquinas 3 y 4 están afectadas por la media de la producción de cortes pero de manera contraria: para la máquina 3 al hacerse muchos cortes, la desviación estándar aumenta por lo que el óptimo se encuentra al haber una baja producción mientras que para la máquina 4 es al contrario, el caso ideal es cuanto más producción de cortes se hace. La desviación de los cortes de la máquina 5 parece no verse afectada por la producción de cortes.

En el gráfico de sdCambios de la máquina 3 se observa un punto que claramente es influyente ya que está muy alejado de la nube de puntos. Se debería estudiar en más profundidad si la desviación típica de los cambios de artículo interactúa con la característica crítica de calidad. En la máquina 4 parece verse una ligera tendencia en forma de recta

descendente aunque la nube de puntos está muy dispersa. En el caso de la máquina 5 también se ve cierta tendencia pero la línea es prácticamente horizontal.

Para todas las máquinas parece ser influyente la media de cambios de artículo que se producen durante un turno pero de manera diferente. Tanto para la máquina 4 como para la 5, al producirse más cambios de artículo se consigue disminuir la desviación estándar de la producción de cortes mientras que, por el contrario, en la máquina 3 el mínimo de la desviación estándar de los cortes se produce cuando se hacen pocos cambios de artículo en el turno.

Para la máquina 5 la desviación estándar de longitud de bobinas producidas es influyente, de manera que al cuando las longitudes de las bobinas varían mucho, se consigue una desviación estándar menor de la característica crítica de calidad.

Por último, la covariable de la media de longitudes de bobinas envasadas sólo parece interactuar con la característica de calidad de en las máquinas 3 y 5 pero de distinta manera. En la máquina 3 el caso óptimo de desviación estándar de la producción de cortes se produce cuando las bobinas son de longitudes pequeñas mientras que para la máquina 5 es cuando las longitudes de las bobinas de salida son grandes.

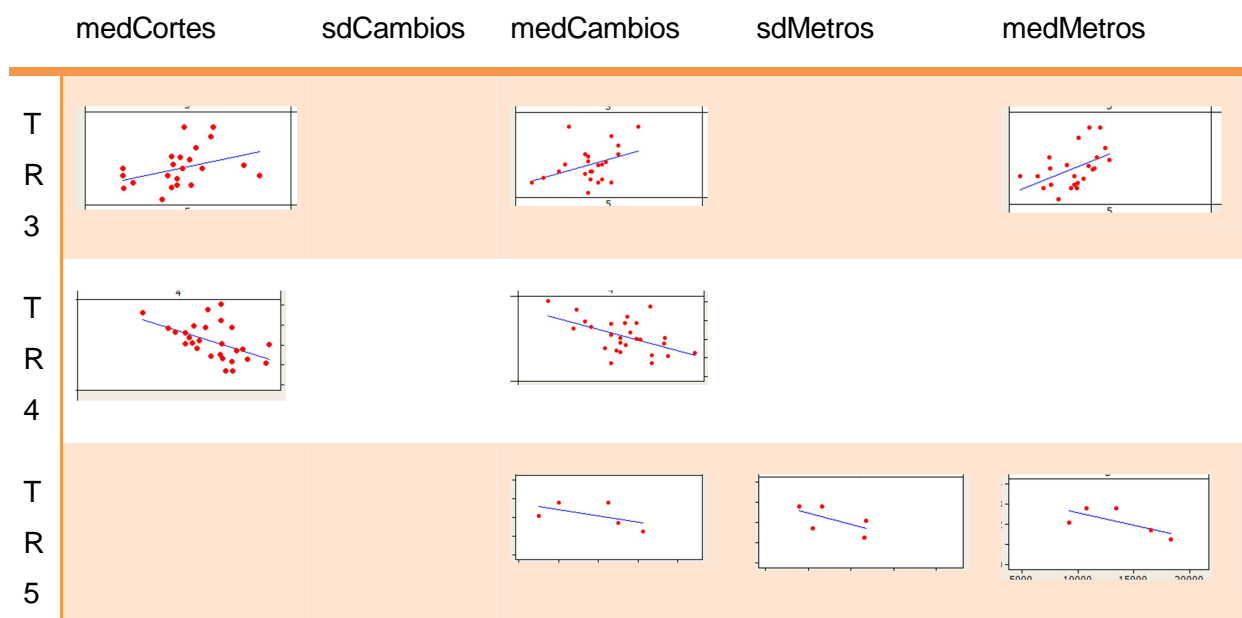


Tabla 6.4. Resumen de las covariables influyentes para los datos agrupados por semana-turno. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.2 se puede observar un resumen de las covariables significativas para cada



máquina de los datos agrupados por semana-turno. En este caso, al tener más datos se obtienen más relaciones: medCortes, medCambios y medMetros para la máquina 3, medCortes y medCambios para la 4 y medCambios, sdMetros y medMetros para la 5.

## 6.3. ANALIZAR

En esta etapa se pretende profundizar en las relaciones observadas en la etapa previa de Medir. Para ello, se inicia detallando el conjunto de posibles causas que podrían estar afectando a la CCC.

### 6.3.1. Diagrama de Causa-Efecto

El diagrama de causa-efecto, también llamado el diagrama de espina de pescado, se trata de una representación gráfica en la que puede verse en forma de grupos cada vez más concretos cuáles son las causas que pueden afectar a un problema a analizar. Cada rama es una entrada y siempre suelen ser las mismas: medidas, materiales, mano de obra, medio ambiente, métodos y máquinas. A partir de estas ramas, se especifican las causas principales se va concretando más en las subcausas.

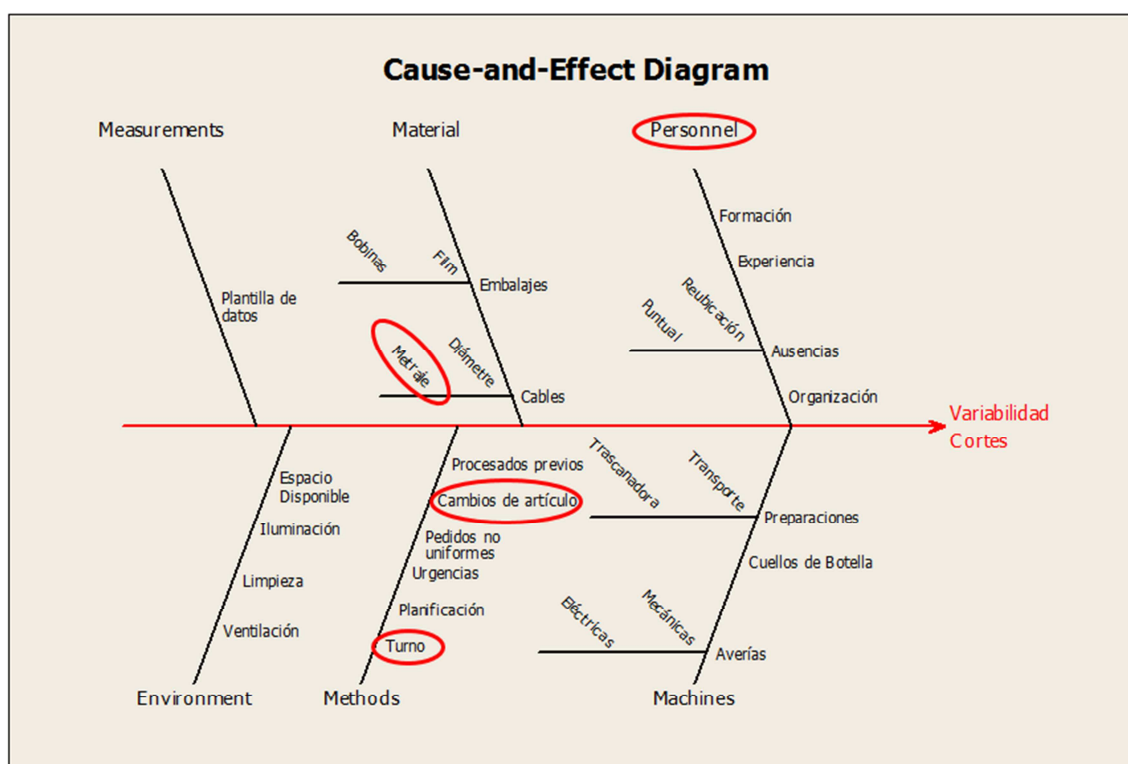


Figura 6.10. Diagrama de causa-efecto de la característica crítica de calidad. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.10 se observa el diagrama explicado aplicado a la variabilidad de cortes de producción. Las ramas principales, causas y subcausas marcadas con un círculo rojo son las que se han podido estudiar en este proyecto dado que se tenían datos de ellas.

### 6.3.2. Modelos de regresión

Se quiere hacer un modelo de regresión que represente el comportamiento de la desviación de la producción de cortes respecto a los demás. Este análisis sólo se efectuará con los datos agrupados por semana-turno, ya que de las otras maneras no tendríamos suficientes observaciones como para poder llevar a cabo sus regresiones.

Para buscar los factores significativos se comienza haciendo un *Best Subsets*. Se ha de verificar el modelo: ha de ser normal, variancia constante e independencia. Se seleccionan como significativos los factores que tienen la  $C_p$  de Mallows más baja. A continuación se ha de hacer una regresión con los factores que han salido al hacer el *Best Subsets*. Se selecciona la opción *VIF (Variance Inflation Factors)* que da una idea de lo independientes que son los factores entre sí. Cuanto más cercanos al valor 1, más ortogonales y, por lo tanto, independientes son. Esto sólo se aplica para modelos explicativos ya que interesa justificar como afectan las covariables en la regresión y se pueden explicar los coeficientes, en los modelos predictivos, los *VIFs* no tienen por qué estar en torno al 1. En el caso que todos los factores estén en torno al 1, se valida el modelo a efectos de interpretar los coeficientes obtenidos.

Este proceso se llevará a cabo para las 3 máquinas que se estudian.

#### 6.3.2.1. Máquina 3

Para poder establecer un modelo de regresión para la máquina 3, se comienza haciendo un *Best Subsets*.

### Best Subsets Regression: sdCortes versus medCortes; medCambios; ...

Response is sdCortes

23 cases used, 3 cases contain missing values

						m									
						m e s m									
						e d d e s									
						d C C d d									
						C a a M M									
						o m m e e									
						r b b t t									
						t i i r r									
						e o o o o									
						s s s s s									
Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows		S										
			Cp												
1	23,0	19,3	1,9	0,85361		X									
1	16,6	12,6	3,6	0,88851		X									
2	30,5	23,6	1,8	0,83071		X X									
2	30,0	23,0	2,0	0,83382		X X									
3	34,9	24,7	2,6	0,82480		X X X									
3	33,4	22,9	3,0	0,83418	X	X X									
4	37,0	23,0	4,1	0,83387	X	X X X									
4	35,7	21,4	4,4	0,84231		X X X X									
5	37,2	18,8	6,0	0,85642	X	X X X X X									

Figura 6.11. Best subsets máquina 3. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.11 se muestra el resultado de haber aplicado *Best Subsets* a las observaciones de la trscanadora 3. Se quiere que la R-Sq sea máxima pero con la Cp de Mallows lo más baja posible. Así pues, se selecciona el modelo que incluye como significativas las variables sdCambios y medMetros.

Para conocer la regresión, aplicamos sólo con estas dos variables la opción *Regression*.

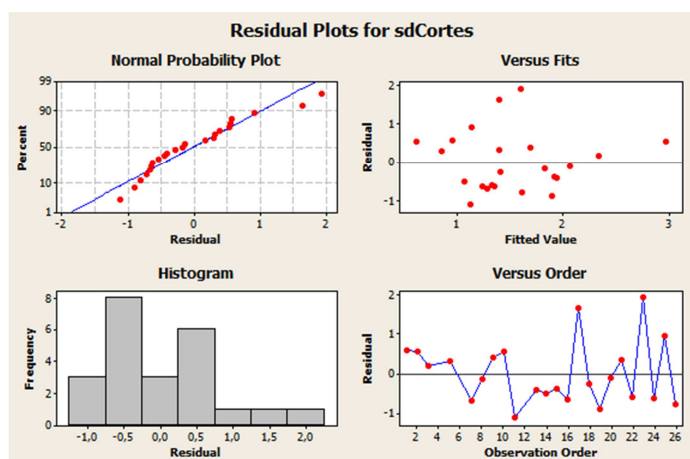


Figura 6.12. Residual plots máquina 3. Fuente: Elaboración propia

Lo primero que aparece son los gráficos que se muestran en la Figura 6.12. Los dos de la

izquierda permiten verificar la normalidad de las muestras, el del extremo superior derecho demuestra que la varianza es constante y, por último, el inferior derecho la independencia.

Una vez validados los datos, se pasa a mirar los resultados de la regresión.

### Regression Analysis: sdCortes versus sdCambios; medMetros

The regression equation is  

$$\text{sdCortes} = -0,534 + 0,242 \text{ sdCambios} + 0,000181 \text{ medMetros}$$

23 cases used, 3 cases contain missing values

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-0,5339	0,8351	-0,64	0,530	
sdCambios	0,2416	0,1639	1,47	0,156	1,101
medMetros	0,00018053	0,00008999	2,01	0,059	1,101

S = 0,830713    R-Sq = 30,5%    R-Sq(adj) = 23,6%

Figura 6.13. Regresión máquina 3. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.13 se muestra la ecuación que representa el comportamiento de la característica crítica de calidad. Aunque para ninguno de los factores se obtiene un p-valor inferior al 0,05 podemos afirmar que son suficientemente bajos como para considerarlos significativos. Mirando los coeficientes de la recta, el hecho de que los que acompañan a los factores sean positivos implica que son directamente proporcionales, es decir, que cuando éstos aumentan, también lo hace la característica crítica de calidad. Para poder realizar esta interpretación sobre el modelo ha sido necesario verificar que no hay problema de multicolinealidad en el modelo. Se aprecia en el listado del modelo que los VIFs son próximos a 1.

#### 6.3.2.2. Máquina 4

De igual manera que se ha hecho con la máquina 3, se comienza haciendo un *Best Subsets* para decidir las variables que incluiremos en el modelo.

### Best Subsets Regression: sdCortes versus medCortes; medCambios; ...

Response is sdCortes

						m									
						m e s m									
						e d d e s									
						d C C d d									
						C a a M M									
						o m m e e									
						r b b t t									
						t i i r r									
						e o o o o									
						s s s s s									
Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows		S										
			Cp												
1	26,6	23,7	1,3	0,78978	X										
1	25,5	22,5	1,6	0,79579	X										
2	32,8	27,2	1,2	0,77126	X X										
2	31,0	25,3	1,8	0,78147	X X										
3	35,2	26,8	2,4	0,77357	X X										
3	33,7	25,0	2,9	0,78289	X X										
4	36,1	24,4	4,1	0,78589	X X X										
4	35,6	23,8	4,3	0,78904	X X										
5	36,5	21,4	6,0	0,80182	X X X X X										

Figura 6.14. Best subsets máquina 4. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 6.14 las variables que se incluyen en el modelo con la R-Sq más alta y la Cp de Mallows más baja son medCortes y medCambios.

Ahora que ya se conocen las variables del modelo, se aplica la opción de *Regression*.

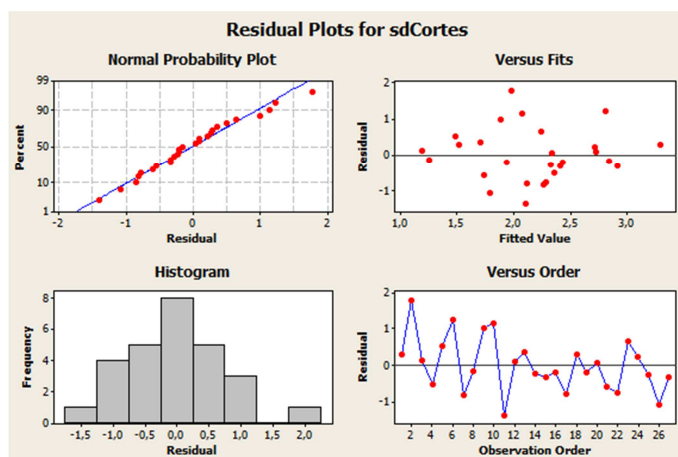


Figura 6.15. Residual plots máquina 4. Fuente: Elaboración propia

Igual que para la máquina 3, los residuos de la máquina 4 demuestran normalidad, variancia constante e independencia como se observa en la Figura 6.15.

Una vez validados los datos, se pasa a mirar los resultados de la regresión.

### Regression Analysis: sdCortes versus medCortes; medCambios

The regression equation is

$\text{sdCortes} = 5,72 - 0,138 \text{ medCortes} - 0,184 \text{ medCambios}$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	5,723	1,219	4,70	0,000	
medCortes	-0,13818	0,09284	-1,49	0,150	1,531
medCambios	-0,1843	0,1140	-1,62	0,119	1,531

$S = 0,771260$     $R\text{-Sq} = 32,8\%$     $R\text{-Sq(adjusted)} = 27,2\%$

Figura 6.16. Regresión máquina 4. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.16 se muestra la recta que relaciona la desviación típica del número de cortes con la media de los cortes y la media del número de cambios de artículo. En este caso, igual que en el anterior, no se tiene ningún p-valor inferior a 0.05 pero sí inferiores a 0,15 por lo que podemos considerarlos significativos. En este caso los dos coeficientes que acompañan a los factores son negativos por lo que son inversamente proporcionales, es decir, cuando éstos aumentan la característica crítica de calidad disminuye.

#### 6.3.2.3. Máquina 5

En el caso de la máquina 5 se tienen muchas menos observaciones, por lo que no es posible hacer la regresión con las medias y las desviaciones estándar, sino solo con las desviaciones. Eso se debe a que al haber semanas en las que sólo ha habido una observación, no puede calcular la desviación aunque sí que calcula la media. Se procede a hacer un *Best Subsets* sólo con las desviaciones típicas de las longitudes de las bobinas y los cambios de artículo.

### Best Subsets Regression: sdCortes versus sdCambios; sdMetros

Response is sdCortes

5 cases used, 6 cases contain missing values

						s
						d s
						C d
						a M
						m e
						b t
						i r
						o o
Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows Cp	S	s s	
1	36,3	15,1	1,0	0,62383	X	
1	10,1	0,0	1,8	0,74140	X	
2	36,7	0,0	3,0	0,76177	X X	

Figura 6.17. Best subsets máquina 5. Fuente: Elaboración propia

En este caso la Cp de Mallows más baja se obtiene al coger solamente como significativo el factor sdMetros. Como se muestra en la Figura 6.17, como la variable respuesta sólo depende de un factor, se puede estudiar con la opción *Fitted Line Plot* de Minitab.

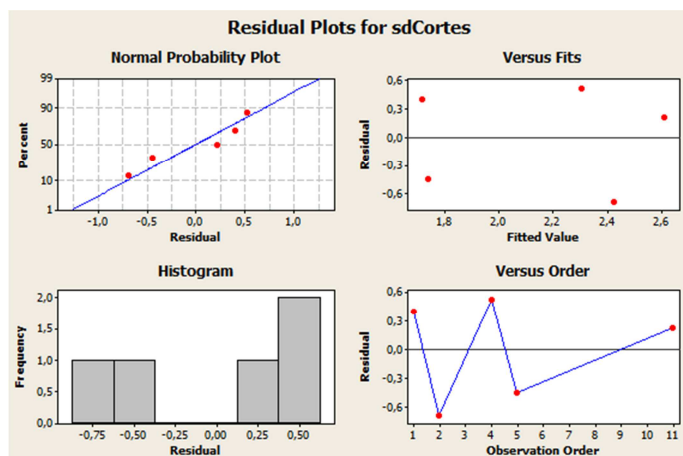


Figura 6.18. Residual plots máquina 5. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.18 se muestran los gráficos que permiten validar los supuestos de normalidad, variancia constante e independencia. Una vez verificados se pueden interpretar los resultados de la regresión.



**Regression Analysis: sdCortes versus sdMetros**

The regression equation is  
 $\text{sdCortes} = 3,060 - 0,000227 \text{ sdMetros}$

S = 0,623825    R-Sq = 36,3%    R-Sq(adj) = 15,1%

|  
 Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,66592	0,665924	1,71	0,282
Error	3	1,16747	0,389158		
Total	4	1,83340			

Figura 6.19. Fitted line plot máquina 5. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.19 se muestra la representación gráfica de la recta de regresión así como su ecuación que relaciona la desviación típica de las longitudes de las bobinas con la característica crítica de calidad. El p-valor que se obtiene es de 0,282 que es bastante elevado y no podríamos afirmar que esta recta representa la realidad. Esto es debido a que para la máquina 5 se tienen muy pocas observaciones. En el caso que se considere la recta, se ha de mirar el coeficiente que acompaña al factor sdMetros, que es negativo por lo que implica que para minimizar nuestra característica crítica de calidad, lo que debe hacer este factor es aumentar lo máximo posible.

**6.3.3. Anova**

Un estudio Anova permite ver si hay diferencias significativas en función de diferentes factores. En este caso queremos saber si existen estas diferencias en función del turno y la semana. Se llevará a cabo el estudio máquina por máquina.

**6.3.3.1. Máquina 3**

Se comienza el estudio mirando si hay diferencias significativas en función del turno:

Igual que se ha hecho en el apartado anterior buscando los modelos de regresión, en este también se debe verificar el modelo comprobando la normalidad, variancia constante e independencia.

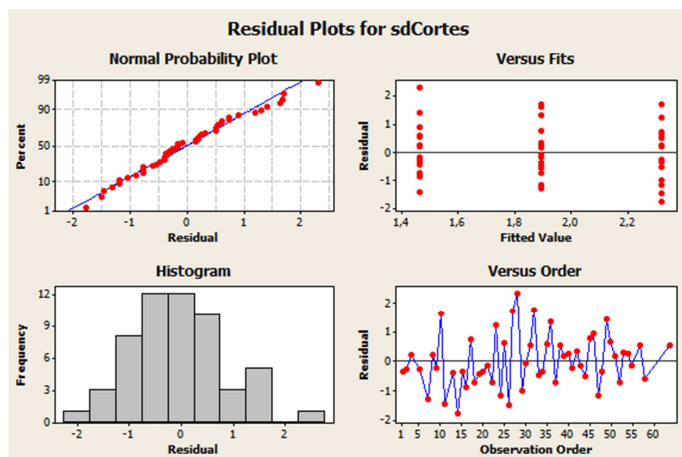


Figura 6.20. Residual plots turno máquina 3. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.20, los dos gráficos de la derecha verifican la normalidad, el de la esquina superior derecha demuestra la variancia constante y el inferior derecho la independencia.

Una vez verificado, se puede pasar a mirar los p-valores del análisis Anova.

# **One-way ANOVA: sdCortes versus Turno**

Source	DF	SS	MS	F	P
Turno	2	6,390	3,195	3,94	0,026
Error	52	42,198	0,811		
Total	54	48,588			

S = 0,9008    R-Sq = 13,15%    R-Sq(adj) = 9,81%

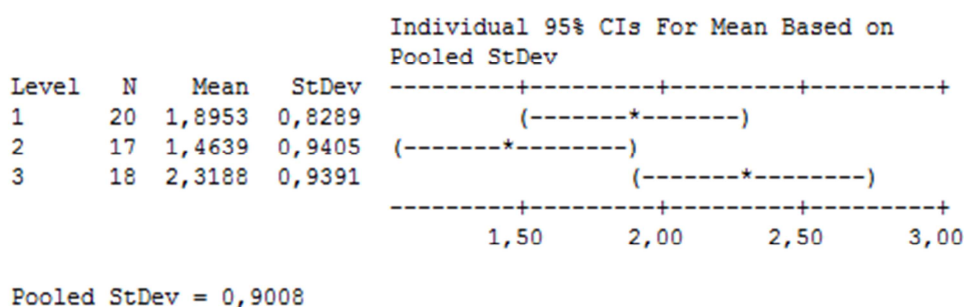


Figura 6.21. Anova turno máquina 3. Fuente: Elaboración propia

El p-valor que se obtiene al hacer el estudio anova y se muestra en la Figura 6.21 es de 0,02, por lo que al ser más bajo de 0,05 se puede afirmar que las diferencias entre turnos son significativas.

Se pasa ahora a estudiar las diferencias entre semanas:

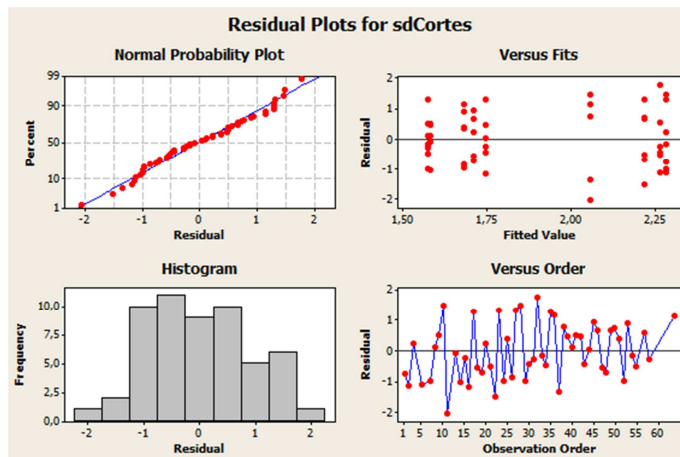


Figura 6.22. Residual plots semana máquina 3. Fuente: Elaboración propia

Los gráficos que se muestran en la Figura 6.22 demuestran que se cumplen los tres supuestos que permiten validar el modelo.

#### One-way ANOVA: sdCortes versus Semana

Source	DF	SS	MS	F	P
Semana	8	4,511	0,564	0,59	0,782
Error	46	44,077	0,958		
Total	54	48,588			

S = 0,9789    R-Sq = 9,28%    R-Sq(adj) = 0,00%

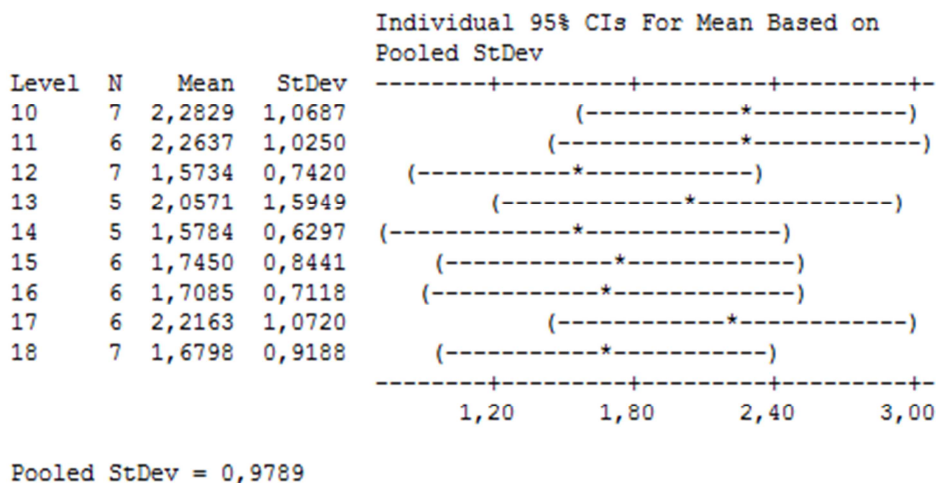


Figura 6.23. Anova semana máquina 3. Fuente: Elaboración propia

En este caso, el p-valor que se obtiene al analizar las diferencias entre semanas y que se muestra en la Figura 6.23 es de 0,782. Es un p-valor muy elevado que no permite afirmar que las diferencias entre las diferentes semanas sean significativas.

Por lo tanto, se concluye que para esta máquina existen diferencias significativas entre los tres turnos diarios pero no entre las diferentes semanas en las que se han recogido los datos.

### 6.3.3.2. Máquina 4

Para esta máquina se sigue el mismo esquema que para la anterior y se comienza estudiando las diferencias entre los diferentes turnos.

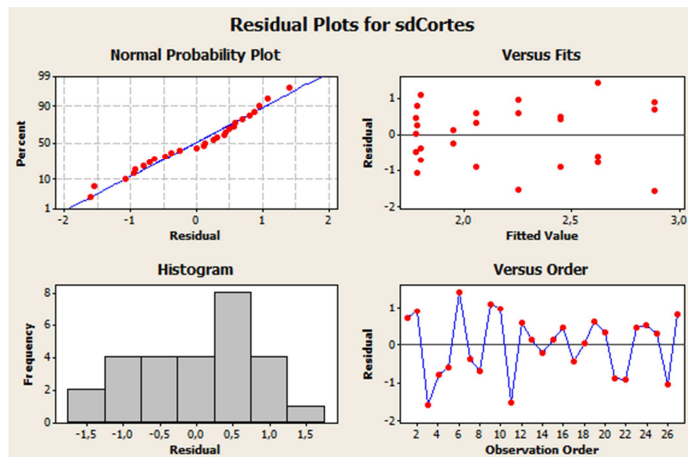


Figura 6.24. Residual plots turno máquina 4. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.24 se muestran los gráficos que permiten validar el modelo.

Se pasa ahora a estudiar el p-valor que se obtiene en el análisis Anova.

**One-way ANOVA: sdCortes versus Turno**

Source	DF	SS	MS	F	P
Turno	2	1,569	0,784	0,96	0,399
Error	24	19,686	0,820		
Total	26	21,255			

S = 0,9057    R-Sq = 7,38%    R-Sq(adj) = 0,00%

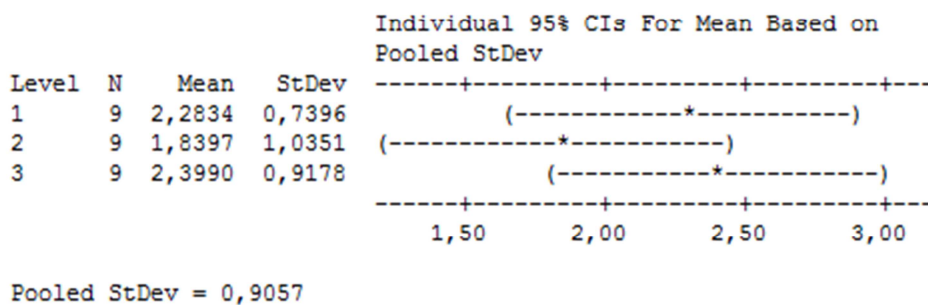


Figura 6.25. Anova turno máquina 4. Fuente: Elaboración propia

El p-valor que se muestra en la Figura 6.25 es de 0,399 por lo que al ser superior a 0,05 se puede concluir que no existen diferencias significativas. También se observan representados los intervalos de confianza de cada máquina y se puede comprobar que se solapan, lo que confirma que las diferencias no son significativas.

En cuanto a las diferencias entre semanas para esta máquina se obtiene lo siguiente:

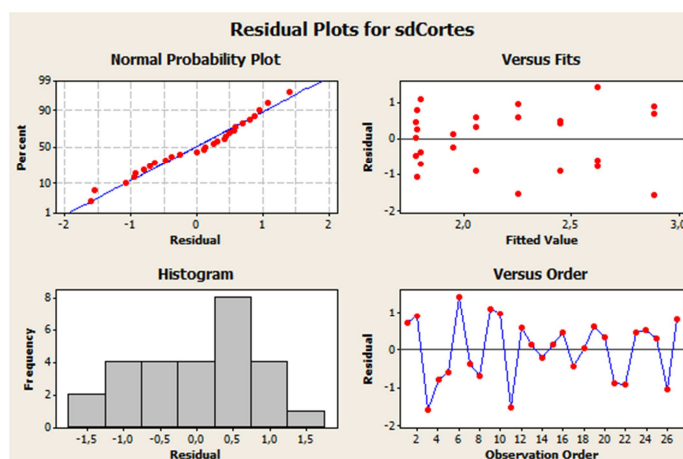


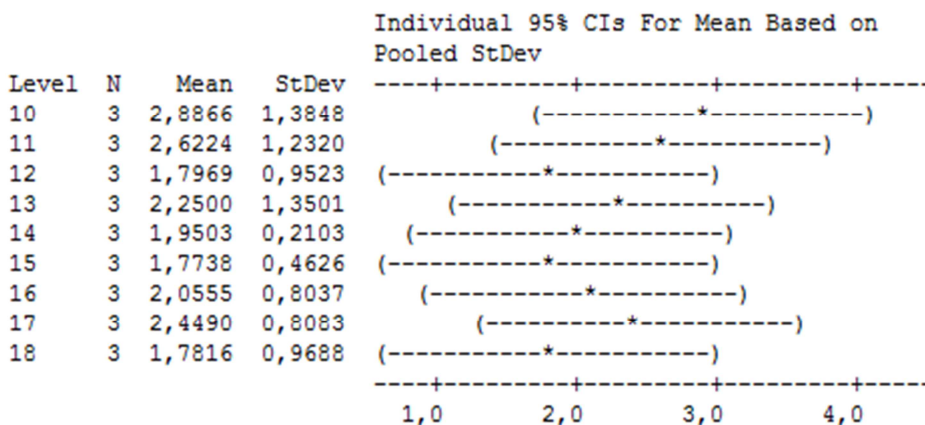
Figura 6.26. Residual plots semana máquina 4. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.26 se muestran los gráficos que permiten verificar el modelo al cumplirse los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia.

### One-way ANOVA: sdCortes versus Semana

Source	DF	SS	MS	F	P
Semana	8	3,932	0,492	0,51	0,833
Error	18	17,322	0,962		
Total	26	21,255			

S = 0,9810    R-Sq = 18,50%    R-Sq(adj) = 0,00%



Pooled StDev = 0,9810

Figura 6.27. Anova semana máquina 4. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los intervalos de confianza representados en la Figura 6.27 y confirma el p-valor de 0,833 no existen diferencias significativas entre las diferentes semanas en las que se han recogido datos de la máquina 4.

Se puede concluir que para esta máquina no existen diferencias significativas entre turnos ni tampoco entre las diferentes semanas.

### 6.3.3.3. Máquina 5

Por lo que respecta a la máquina 5, se tienen menos observaciones que en el resto de máquinas pero se lleva a cabo el estudio de igual manera.

Se comienza estudiando las posibles diferencias significativas entre los turnos:

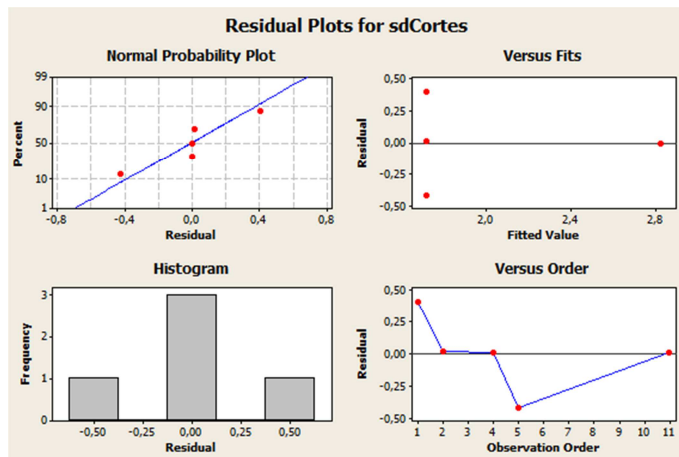


Figura 6.28. Residual plots turno máquina 5. Fuente: Elaboración propia

Aunque se tienen muy pocos datos, se puede decir que los gráficos que se muestran en la Figura 6.28 permiten validar el modelo.

### One-way ANOVA: sdCortes versus Turno

Source	DF	SS	MS	F	P
Turno	1	1,488	1,488	12,93	0,037
Error	3	0,345	0,115		
Total	4	1,833			

S = 0,3392    R-Sq = 81,17%    R-Sq(adj) = 74,90%

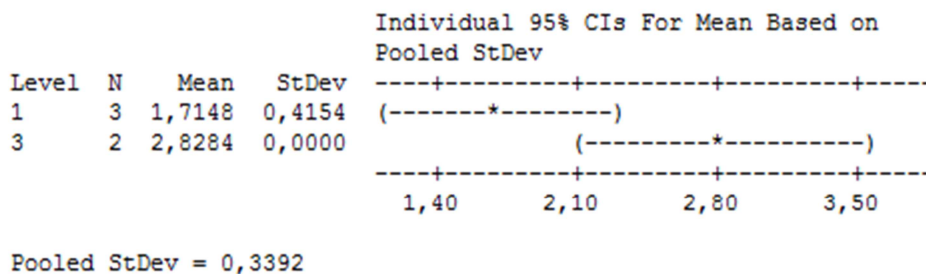


Figura 6.29. Anova turno máquina 5. Fuente: Elaboración propia

Lo primero que se aprecia en la Figura 6.29 es que a diferencia de las dos máquinas anteriores, en la máquina 5 no se ha recogido ningún dato del segundo turno, por lo que sólo se podrá comprobar si las diferencias son significativas entre el turno de mañana y el de noche. El p-valor que se obtiene del estudio Anova es de 0,037 que, al ser inferior a 0,05, puede afirmarse que hay diferencias significativas entre dichos dos turnos.

En cuanto a las posibles diferencias entre semanas en la máquina 5 se obtiene lo siguiente:



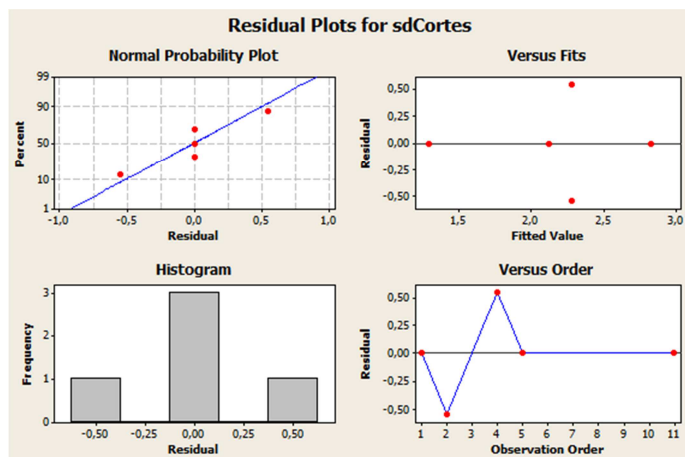


Figura 6.30. Residual plot semana máquina 5. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 6.30, al buscarse las diferencias entre semanas se tienen muy pocas observaciones, igual que pasaba con los turnos pero esto no impide que se pueda validar el modelo.

Se pasa ahora a mirar el p-valor que se obtiene al hacer el estudio Anova.

### One-way ANOVA: sdCortes versus Semana

Source	DF	SS	MS	F	P
Semana	3	1,232	0,411	0,68	0,687
Error	1	0,601	0,601		
Total	4	1,833			

S = 0,7753 R-Sq = 67,22% R-Sq(adj) = 0,00%

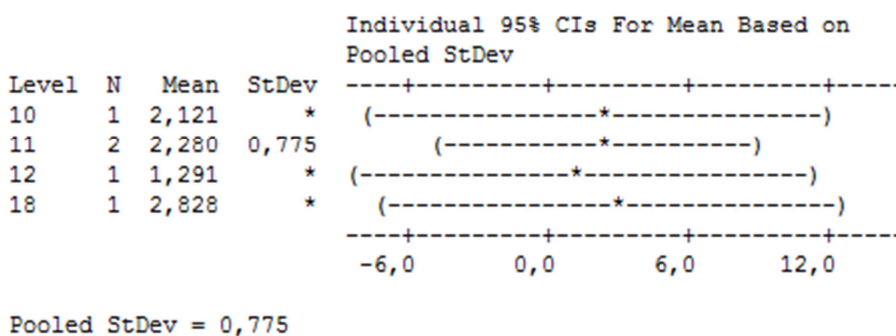


Figura 6.31. Anova semana máquina 5. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.31 se muestra el p-valor para las cuatro semanas que contienen datos suficientes para poder ser incluidas en el estudio. Dicho p-valor es de 0,687 por lo que al ser tan alto no se puede concluir que las diferencias entre las semanas sea significativa.



Por lo tanto, se puede concluir que las diferencias entre el primer y tercer turno en la máquina 5 son significativas mientras que por lo que respecta a las diferentes semanas no pueden afirmarse que dichas diferencias son significativas.

#### 6.3.4. Análisis confirmatorio

Se quiere confirmar que las covariables que se han encontrado en el apartado *Modelo de regresión* y que las diferencias en el apartado *Anova* son reales. Esto se hace mediante un análisis confirmatorio que consiste en llevar a cabo un diseño de experimentos. El DOE, o diseño de experimentos, es una técnica estadística para identificar y cuantificar las causas de un efecto. Consiste en manipular deliberadamente las variables para medir el efecto que tienen sobre la variable de interés. Un experimento factorial completo es un experimento cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno de los cuales tiene distintos niveles y las combinaciones cubren todas las posibles opciones. En el supuesto que no sea un diseño factorial completo, existen combinaciones que representan más de una opción con lo que permite reducir el coste de la experimentación. La mayoría de DOEs toman como base 2, es decir, tan sólo se tienen dos niveles para cada factor. En el caso estudiado existen 5 factores que pueden ser significativos en la varianza de la producción de cortes, por eso el diseño podría hacerse de diferentes maneras.

Ahora se muestran cuáles son y se debaten sus pros y contras:

$$2_{V}^{5-1}$$

En este caso la resolución del experimento es V, por lo tanto, muy buena ya que sólo se confunden interacciones dobles con triples y triples con triples. Al estar agrupados los datos por semana y turno, para cada observación hace falta una semana por lo que se necesitarían 16 semanas para poder recoger todos los datos, por lo que es muy difícil de llevar cabo.

Otro diseño sería el siguiente:

$$2_{III}^{5-2}$$

Por el contrario, si se quiere minimizar el tiempo del experimento a 8 semanas, que es aceptable, la resolución baja drásticamente a nivel III. Se confunden los factores primarios con las interacciones dobles, por lo que se debe descartar.

Por otro lado, se debe mirar la viabilidad del análisis confirmatorio. No sólo en cuanto a los recursos de tiempo que se emplearán sino también a si es posible llevarlo a cabo. Los

factores que se estudian son medidas medias y desviaciones estándar, por lo que no son fácilmente controlables e introducen factores de ruido. Para poder llevar a cabo el experimento se deberían de modificar otros parámetros que indirectamente hicieran variar los que son de nuestro interés (medias y desviaciones). En un planteamiento ideal, los valores de los factores del DOE se deberían poder fijar en dos niveles (alto y bajo). Si las covariables fueran directamente el número de metros o cambios de artículo realizados en una sesión, podría planificarse la recogida de datos, no sin dificultad. Pero en el presente caso, los factores son medidas resumen, lo cual haría prácticamente imposible establecer una estrategia que permitiera fijar los niveles deseados. En todo caso, en lugar de llevar a cabo un DOE se podría plantear una recogida de datos más exhaustiva y de mayor recorrido para intentar incluir la mayoría de configuraciones y confirmar al menos las relaciones observadas mediante modelos de regresión.

### 6.3.5. Plantillas de recogida de datos

En este apartado se describen las diferentes plantillas de recogida de datos que se tienen en la empresa, incluyendo la que se utiliza actualmente en las máquinas trascanadoras. En el Anexo C se pueden ver unos ejemplos de estas plantillas.

#### 6.3.5.1. Plantilla actual

En la Tabla 6.5 se detallan los pros y contras de la plantilla actual de recogida de datos:

PROS	CONTRAS
-Recoge mucha información	-Sólo se recogen los datos de cuando la máquina está en marcha
-Es fácil de ver la producción	-No es temporal
	-Demasiados datos y los operarios no lo rellenan correctamente
	-Muchas hojas para cada día

Tabla 6.5. Pros y contras de la plantilla actual trascanadoras

#### 6.3.5.2. Plantilla “multifilares”

En la Tabla 6.6 se detallan los pros y contras de la plantilla de recogida de datos de multifilares:

PROS	CONTRAS
-Información temporal	-Muy laboriosa de rellenar y a veces lleva a error a los operarios
-Una única plantilla para cada máquina y día	--Demasiados datos y los operarios no lo rellenan correctamente
-Se recogen los datos tanto de la máquina en marcha como de sus paros	

Tabla 6.6. Pros y contras de la plantilla multifilares

#### 6.3.5.3. Plantilla “turonadoras”

En la Tabla 6.7 se detallan los pros y contras de la plantilla de recogida de datos de las turonadoras:

PROS	CONTRAS
-Fácil de rellenar	-No se muestra detalladamente la producción
-Se muestran los tiempos en los que la máquina está en marcha/parada	-No es temporal

Tabla 6.7. Pros y contras de la plantilla turonadoras

#### 6.3.5.4. Recogida informática

En la Tabla 6.8 se detallan los pros y contras de la recogida informática de datos:

PROS	CONTRAS
-Minimiza los tiempos de análisis de datos	-Alta inversión en instalaciones
-Minimiza los tiempos de anotación de datos (operarios)	-Alta inversión en formación de los operarios
-Información temporal	-Posibles fallos informáticos
-No hay errores por mala cumplimentación	

Tabla 6.8. Pros y contras de la recogida informática de datos



## 6.4. MEJORAR

Esta etapa es teórica ya que no se han podido confirmar que los factores seleccionados son realmente significativos porque no se ha podido llevar a cabo el diseño de experimentos adecuado. Se parte de la base que las relaciones detectadas en la etapa Medir puedan haber sido confirmadas posteriormente, y se procederá a proponer estrategias de Mejora consecuentes con estos resultados. Por ello, esta etapa tiene un carácter mayormente ilustrativo.

### 6.4.1. Niveles de los factores significativos

Para conseguir un nivel mínimo de variabilidad de la característica crítica de calidad, si se consideran significativos los factores encontrados en la etapa de analizar se tiene lo siguiente:

Máquina	Factores significativos	
3	sdCambios ↓	medMetros ↓
4	medCortes ↑	medCambios ↑
5	sdMetros ↑	

Tabla 6.9. Factores significativos para cada máquina con su nivel alto/bajo. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.9 se muestran los factores significativos para cada máquina e indicado con una flecha, en qué nivel deberían permanecer para optimizar la característica crítica de calidad. No se puede intentar hacer variar la característica crítica de calidad directamente ya que ésta es muy compleja, incluso intentar hacer variar los factores que hacen que esta tome diferentes valores también es complicado.

### 6.4.2. Lluvia de ideas

Analizando el diagrama causa-efecto del apartado anterior y haciendo una lluvia de ideas de posibles maneras que podrían hacer variar la variabilidad de la producción de cortes. Se han propuesto diferentes maneras de reducir la variabilidad atacando las diferentes ramas del diagrama causa y efecto.

#### **6.4.2.1. Planificación de la producción**

Una posible solución a la problemática de la variabilidad es incrementar la planificación de la producción. Ya se ha visto que para todas las máquinas el hecho de incrementar el número de cambios de artículo, por ejemplo, hace aumentar la variabilidad. Una manera de prever estos cambios y tratar de disminuirlos sería una correcta planificación. Otro ejemplo sería tratar de hacer siempre el mismo metraje de cortes, aunque esto supusiera hacer muchos cortes de bajas longitudes y muy pocos de altas.

Esta solución es difícil de implementar ya que hay un porcentaje de pedidos urgentes que se han de entregar de un día para otro y tienen prioridad a la hora de hacer la planificación.

#### **6.4.2.2. Formación de los operarios y especialización**

Al hacer los análisis de los diferentes operarios se ha visto que hay un gran número de personas que intervienen en el envasado de los cables. Al estudiar los tres operarios que más intervenciones han realizado se observa que sus resultados están por encima de la media, es decir, durante su turno se produce menos variabilidad de cortes. Otra solución alternativa sería una mayor formación de los operarios e intentar que siempre fueran los mismos los que trabajan en una máquina concreta, para que así estuvieran especializados en cuáles son los fallos más recursivos de cada una y como poder solventarlos rápidamente. Esta opción sería sencilla de aplicar y los tres operarios que más trabajan con estas máquinas podrían ser los que se encargaran de las formaciones.

#### **6.4.2.3. Menos especialización de las máquinas**

Los pedidos que encargan los clientes son muy variables y rara vez se puede tener en stock lo que va a solicitar dado que es una cantidad exacta de metros de cable. Esto es negativo para los pedidos urgentes dado que, si se quieren satisfacer, se ha de parar la producción prevista para llevarlos a cabo. Una manera de evitar parar la producción sería conseguir planificar los pedidos normales en tan sólo dos máquinas y tener una de apoyo que sólo sirva los urgentes. Para ello, la máquina de apoyo debería ser capaz de envasar cualquier diámetro de cable y tamaño de bobina por lo que se debería hacer una inversión para universalizarla.

#### **6.4.2.4. Nuevas plantillas de recogida de datos**

Existen factores que no se han podido estudiar dado que no se tenían datos. Un ejemplo es los tiempos que se dedican en preparación de las máquinas o el número de averías que se producen. Esta información sería interesante para poder tener datos de rendimientos de las máquinas y saber si hay un mismo pedido que se puede llevar a cabo en dos máquinas diferentes cual es la más conveniente. Además, actualmente existen datos que se incluyen

en las plantillas que no se revisan ni son de utilidad por lo que el operario pierde tiempo anotándolos.

Las plantillas de recogida de datos han de contener los datos que son estrictamente necesarios para un análisis posterior y de fácil cumplimentación para el operario para evitar que estén mal rellenas.

#### **6.4.2.5. Renovación de las bobinas en mal estado**

Los materiales que se utilizan para el envasado del cable también juegan un papel crucial en la variabilidad de los cortes. Un ejemplo que los operarios dicen que complica su trabajo diario es el estado de las bobinas. Algunas están viejas y han perdido su concentricidad, es decir, están ligeramente ovaladas. En el momento de hacer el cambio entre la que anteriormente estaba en la máquina y la nueva bobina se pierde tiempo ya que no permanecen estables en el suelo. Por otro lado, cuando están cargadas en la máquina los bordes pueden llegar a rozar con la máquina produciendo más desgastes o disminuyendo la velocidad de producción.

### **6.5. CONTROLAR**

Esta etapa igual que la anterior es teórica. Una vez llevado a cabo el proyecto, se debería cuantificar la mejora que se ha obtenido, es decir, medir la nueva variabilidad de los cortes de producción. Entre otros elementos a considerar se podría implementar un gráfico de control sobre la variabilidad del número de cortes. El objetivo sería determinar si esta característica se mantiene estable y en los niveles deseados tras implementar las mejoras.

Después de una nueva recogida de datos con las mejoras ya implementadas, se pueden dar diferentes situaciones:

- Se encuentran diferencias significativas respecto al estado inicial:
  - Mejora de los resultados
  - Empeoramiento de los resultados
- No se encuentran diferencias significativas respecto al estado inicial

Solamente en el caso de que se produzca una mejoría respecto al estado inicial se podría considerar que el proyecto ha sido un éxito. En los otros dos casos se tendría que seguir estudiando para alcanzar una optimización del proceso.

Independientemente el resultado obtenido, sería conveniente seguir un control continuo de

la característica crítica de calidad para verificar que se mantiene en unos valores aceptables, o incluso se podría plantear la opción de seguir mejorando.

Para poder cuantificar el resultado del proyecto, se podría hacer un estudio económico del gasto que se producía cuando la variabilidad era alta, antes de la implementación de este, y el que se tiene una vez finalizado.

No sólo se debería valorar la mejora de la característica crítica de calidad sino también que se debe a las acciones derivadas del proyecto. Por ejemplo, si se optara por una mejora de la planificación como se ha propuesto en el apartado anterior, debería estudiarse su grado de cumplimiento.



## 7. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y COSTES

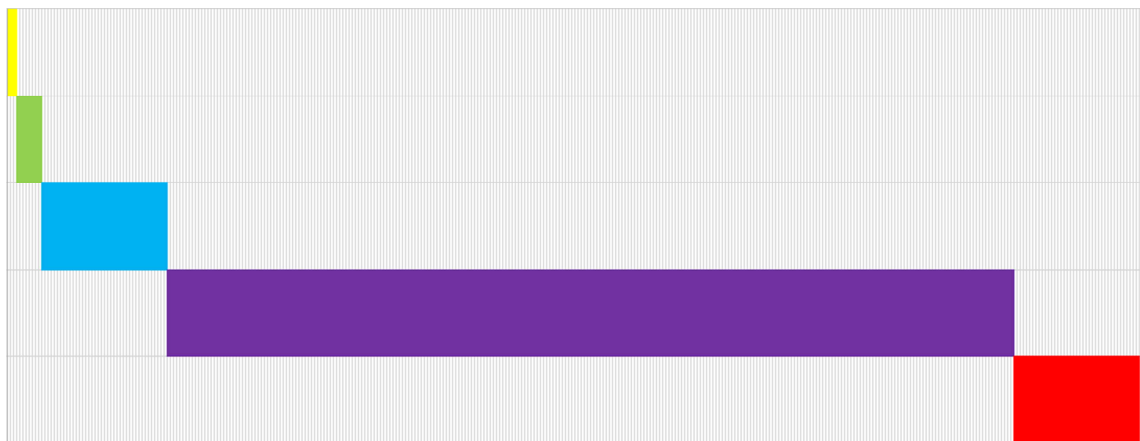
Por lo que se refiere a la planificación temporal y los costes del presente proyecto, al tratarse de una mejora de un proceso que, en parte, se ha llevado a cabo teóricamente su coste es bastante reducido.

### 7.1. Planificación temporal

En el presente apartado se explica cómo se han invertido las horas para la realización del proyecto. Se ha distinguido entre la planificación teórica que se previó antes de que éste comenzara y la que al final ha resultado ser.

#### 7.1.1. Planificación teórica

En la Figura 7.1 se pueden ver las horas que se habían previsto invertir en cada una de las partes para la confección del trabajo. La suma total de horas son las correspondientes con los 12 créditos ECTS, es decir, 360 horas.

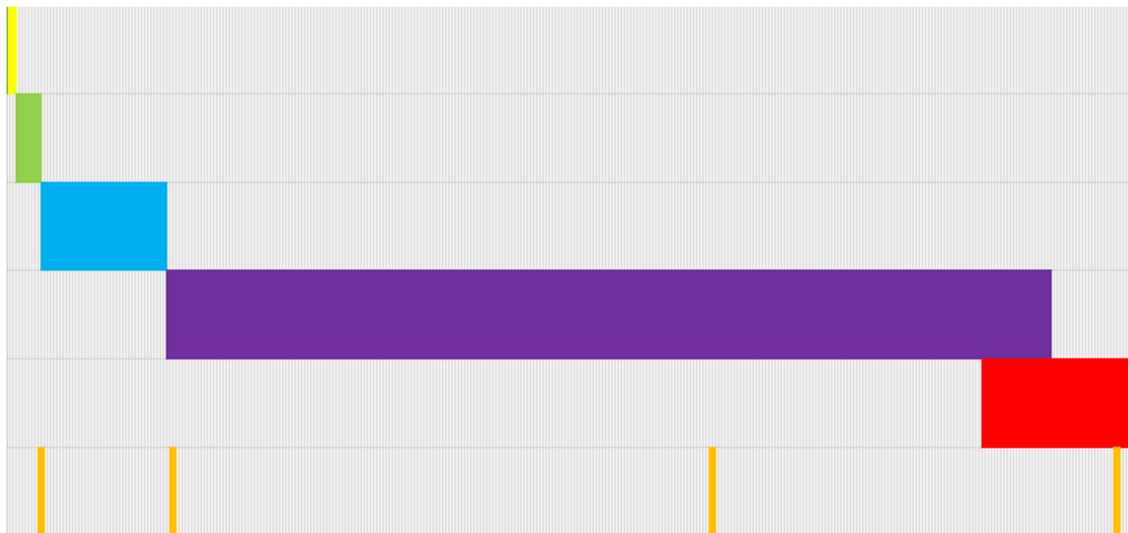


- Elección del tema para el proyecto de fin de grado
- Búsqueda de tutor en la universidad
- Documentación y búsqueda de información
- Aplicación de la metodología *Six-Sigma* en el proyecto
- Confección de la memoria

Figura 7.1. Planificación teórica del proyecto. Fuente: Elaboración propia

### 7.1.2. Planificación real

Por diversos motivos, las horas que se habían previsto en un momento inicial, no se han cumplido estrictamente, y algunos apartados se han visto alargados y se han solapado con otros. En la Figura 7.2 se detalla el tiempo invertido en cada fase y el número total de horas reales empleadas para la confección del trabajo ha sido de 390 horas.



- Elección del tema para el proyecto de fin de grado
- Búsqueda de tutor en la universidad
- Documentación y búsqueda de información
- Aplicación de la metodología *Six-Sigma* en el proyecto
- Confección de la memoria
- Reuniones con el tutor

Figura 7.2. Planificación temporal real. Fuente: Elaboración propia

La parte en la que se han invertido más horas ha sido la de analizar los datos para llevar a cabo el proyecto, es decir, la aplicación de la metodología *Six-Sigma* para la disminución de la variabilidad del proceso de fabricación. Entre todas las etapas de dicha metodología, en las que más se ha profundizado y han sido más costosas de elaborar son Medir y Analizar. En la Figura 7.3 se observa el porcentaje de tiempo que se ha invertido en cada etapa del método.

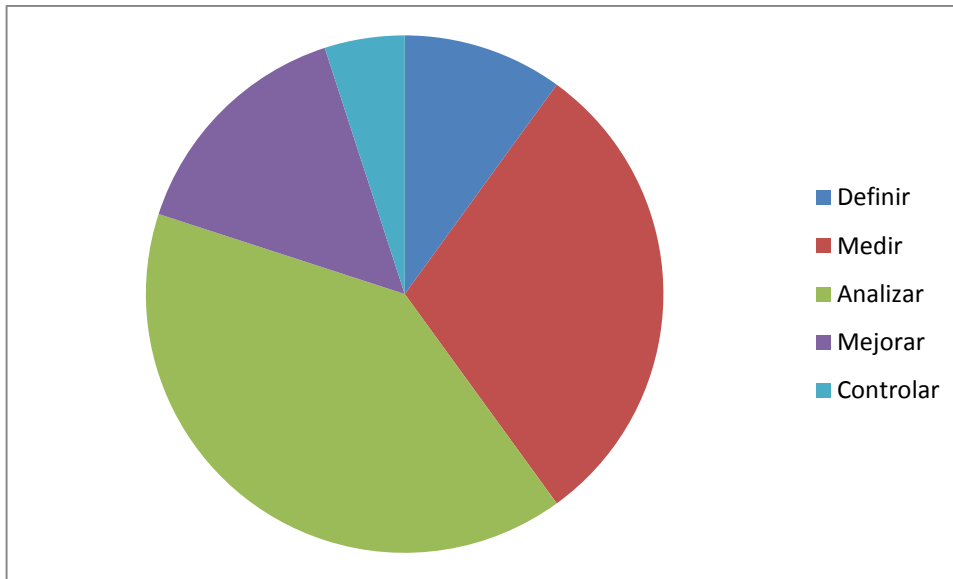


Figura 7.3. Porcentaje de tiempo invertido en cada etapa de la metodología Six-Sigma.  
Fuente: Elaboración propia

La etapa Analizar corresponde a un 40% de las horas, Medir tiene un peso del 30% y en la que menos se ha podido profundizar es Controlar con un 5%.

## 7.2. ESTUDIO ECONÓMICO

El objetivo de este apartado es detallar el balance económico del presente proyecto. Si bien resulta complicado cuantificar los beneficios que se podrían haber producido gracias a la implementación del proyecto, sí que es posible hacer un estudio de los costes asociados al estudio, como proyecto dentro de un trabajo de fin de grado.

Se podrían dividir los costes económicos en distintos conceptos:

- Infraestructura:
  - Establecimiento: es el lugar de trabajo y desarrollo del proyecto (podría ser la oficina)
  - Material de ofimática: libretas, bolígrafos, lápices, folios...
  - Hardware: Ordenador de sobremesa, pantalla, ratón, teclado...
  - Software: licencias de los programas utilizados
- Consumo energético:
  - Luz, climatización...

- Coste humano:
  - Salario asociado a un estudio de ingeniería
  - Transporte

En cuanto a la partida del establecimiento, se puede considerar nula ya que se ha realizado en las oficinas de la empresa dónde se ha realizado el estudio y, por lo tanto, no ha supuesto un gasto adicional. Lo mismo ocurre con el consumo energético ya que el valor de esta partida es tan pequeño que puede ser menospreciado. Las demás partidas sí se considerarán en el estudio económico.

Para realizar el cálculo se tiene en cuenta el tiempo de dedicación relativo al presente trabajo de fin de grado. Para el material de ofimática, se estima un gasto razonable, y para el salario de un ingeniero se toma un precio base de 30€/h. Por lo que respecta al hardware y software, se considera que son conceptos amortizables, dentro de la empresa, a 5 años. Así pues, sólo se tendrá en cuenta la fracción correspondiente a las horas de dedicación. El coste del software Minitab se considerará nulo ya que se ha utilizado la versión de estudiante y no ha supuesto ningún coste extra y otras licencias como Microsoft Office o Windows se incluirán en el coste del ordenador.

La cantidad de horas dedicadas al proyecto es de 360 (de acuerdo con la equivalencia entre créditos ETCS y horas). Considerando una jornada laboral de 8 horas diarias, esto equivale a unas 9 semanas, es decir, aproximadamente 2 meses.

En las siguientes tablas se detalla el cálculo correspondiente a la infraestructura y coste humano.

En la Tabla 7.1 se especifica los costes por hardware y software teniendo en cuenta la amortización:

Hardware y Software	Coste total [€]	Tiempo de amortización [meses]	Tiempo dedicado [meses]	Coste asociado [€]
Ordenador	2.000,00€	60	2	66,67
Pantalla	200,00€	60	2	6,67
Ratón	30,00€	24	2	2,50

<b>Teclado</b>	30,00€	24	2	2,50
<b>SUBTOTAL</b>				<b>78,34</b>

Tabla 7.1. Subtotal hardware y Software. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7.2 se explica el coste del transporte diferenciando los trayectos a la empresa dónde se realiza el proyecto y los de las reuniones en la universidad.

<b>Transporte</b>	<b>Coste por trayecto [€/trayecto]</b>	<b>Número trayectos</b>	<b>de</b>	<b>Coste asociado [€]</b>
<b>Empresa del proyecto</b>	5,00	45,00		225,00
<b>Universidad</b>	3,00	6,00		18,00
<b>SUBTOTAL</b>				<b>243,00</b>

Tabla 7.2. Subtotal transporte. Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Tabla 7.3 se obtiene el coste del ingeniero recién titulado.

<b>Salario</b>	<b>Coste por hora</b>	<b>Tiempo dedicado</b>	<b>Coste asociado [€]</b>
<b>Ingeniero recién titulado</b>	30,00 [€/h]	360 [h]	<b>10.800,00</b>

Tabla 7.3. Subtotal salario. Fuente: Elaboración propia

Además de estos gastos se tiene el material ofimático que se estima que ha supuesto un coste de 10€.

Por lo tanto, el coste total del proyecto, que es la suma de los subtotales, se detalla en la Tabla 7.4.

<b>Hardware y Software</b>	78,34
<b>Transporte</b>	243,00
<b>Salario</b>	10.800,00
<b>Material de ofimática</b>	10,00
<b>TOTAL</b>	11.131,34

Tabla 7.4. Total coste del proyecto. Fuente: Elaboración propia

## 8. IMPACTO AMBIENTAL

Este proyecto se basa en un estudio para optimizar un proceso de fabricación reduciendo su variabilidad. Esto implica que el impacto ambiental directo que se ha producido sea mínimo ya que todo el proyecto se ha llevado a cabo con ordenador y esto sólo produce consumo eléctrico. Por otro lado, las mejoras propuestas en el proyecto no implicarían un impacto ambiental muy elevado. A continuación, se analizan una por una estas mejoras y se comenta en cómo podrían suponer un impacto ambiental.

Primero de todo, llevar una planificación más exhaustiva de la producción implicaría de un nuevo software para la empresa que se encargue de dicha planificación. Esto comportaría nuevos equipos informáticos.

Una mayor formación de los operarios no supondría ningún impacto ambiental más allá del consumo eléctrico que supondría hacer una sesión de formación.

Por otro lado, una menor especialización de las máquinas, pudiendo universalizar una de ellas para que pueda hacer todo tipo de fabricaciones de cable supondría una inversión en las máquinas provocando que se produjera un mayor consumo de electricidad y el ruido, produciendo contaminación acústica.

El hecho de renovar las plantillas de datos tampoco supondría ningún impacto ambiental más allá del consumo de energía que se derivaría del estudio y la impresión de los boletines. Si se decidiera que las nuevas plantillas de datos estuvieran informatizadas esto comportaría un gasto energético mayor debido a la instalación y posterior utilización.

Por último, la renovación de las bobinas, que es el envase dónde se almacena el cable y son de madera, supondría tener que reciclar las bobinas viejas, ya puede como fuente de biomasa o reutilizando su madera para las nuevas.

En conclusión, ninguna de las opciones de mejora supone un impacto ambiental elevado, sin embargo, las que tienen mayores consecuencias ambientales son la mejora de la planificación debido a la utilización del nuevo software y la renovación de las bobinas por el hecho de reciclar la madera.





## CONCLUSIONES

El alcance de la metodología *Six-Sigma* como herramienta de mejora de procesos y productos es mundial. Cada vez más empresas se unen a su filosofía y aplican sus pasos por tal de mejorar tanto económicamente como también en términos de calidad y eficiencia.

La oportunidad que se me brindó en la empresa en la que se han realizado las prácticas de aplicar este programa de mejora a un proceso real de fabricación era una excelente oportunidad para expandir mis conocimientos en la filosofía *Lean* así como también en los procesos internos de la empresa.

Los resultados, aunque no han podido ser aplicados, se pueden considerar satisfactorios. No es posible saber con certeza si se habrían conseguido mejoras pero el hecho de llevar a cabo el proyecto me ha permitido comprender mejor la problemática y saber por dónde se debería atacar para intentar solventarla.

Por otro lado, destacar el papel de la metodología, que ha conseguido profundizar los conocimientos de la filosofía de la mejora continua a los empleados implicados en el proyecto que ya estaban formados en esta materia. Además, se ha dado a conocer para aquellos que nunca antes la habían aplicado.

La principal complicación de este proyecto ha sido la complejidad de la característica crítica de calidad al tratarse de una variabilidad y la necesidad de agrupar los datos para obtener muestras. Esta agrupación planteaba el problema de la pérdida de robustez que se produce al disgregar los datos para poder conseguir más muestras.

Otra complicación ha sido no poder llegar a completar de manera práctica las etapas de mejora y control por lo que han tenido que ser teóricas. Sin embargo, se han propuesto soluciones basadas en los datos encontrados en el capítulo de análisis y se han estudiado las diferentes situaciones que se podrían dar según lo positivas que fueran estas medidas.

En esencia, este proyecto es una hoja de ruta de cómo se debería encarar una implementación de *Six-Sigma* en el proceso estudiado.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pdcahome.com. (2016). *Seis Sigma: Proyectos de mejora basados en datos estadísticos / PDCA Home*. [online] Disponible en: <http://www.pdcahome.com/seis-sigma/> [Consultado el 1 Abril 2016].
- [2] Es.wikipedia.org. (2016). *Seis Sigma*. [online] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Seis\\_Sigma](https://es.wikipedia.org/wiki/Seis_Sigma) [Consultado el 1 Abril 2016].
- [3] Isixsigma.com. (2016). *What Is Six Sigma?* [online] Disponible en: <http://www.isixsigma.com/new-to-six-sigma/getting-started/what-six-sigma/> [Consultado el 1 Abril 2016].
- [4] Docplayer.es. (2016). *Capítulo 2: Marco Teórico*. [online] Disponible en: <http://docplayer.es/3955143-Capitulo-2-marco-teorico-en-este-capitulo-se-expondra-lo-que-es-la-metodologia-seis-sigma-cuales-son-sus.html> [Consultado el 4 Abril 2016].
- [5] Manufactura Inteligente. (2014). *Qué es 6 sigma? - Manufactura Inteligente*. [online] Disponible en: <http://www.manufacturainteligente.com/6-sigma> [Consultado el 4 Abril 2016].
- [6] Support.minitab.com. (2016). *Introducción - Minitab*. [online] Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/getting-started/introduction/> [Consultado el 17 May 2016].
- [7] Pedro Lara V. (2013). *Los Principios y Herramientas de Seis Sigma*. [online] Disponible en: <https://pedrolarav.com/2013/05/31/los-principios-y-herramientas-de-seis-sigma/> [Consultado el 18 Mayo 2016].
- [8] Burman, L., Reed, W. and Alm, J. (2010). A Call for Replication Studies. *Public Finance Review*, 38(6), pp.787-793.
- [9] Pdcahome.com. (2016). *Diseño de experimentos (DOE): Para qué sirve y cómo realizarlo* [online] Disponible en: <http://www.pdcahome.com/2117/disenio-de-experimentos-para-que-sirve-y-como-realizarlo/> [Consultado el 11 Junio 2016].